

# **Частотно-регулируемый привод. Регулирование центробежных насосов и методы регулирования отпуска тепла в тепловых сетях.**

## **1. Насосы в энергетике**

Центробежные насосы нашли широкое применение в различных сферах деятельности: тепло- и водоснабжение, системы охлаждения, всюду, где требуется перекачка различных жидкостей и, в основном, воды.

В энергетике центробежные насосы широко применяются на тепловых станциях (циркуляционные и конденсатные, сетевые насосы и насосы в системах химводоподготовки), в тепловых сетях систем теплоснабжения (насосно-перекачивающие, смешивающие станции), в независимо присоединяемых системах отопления, а также горячего и холодного водоснабжения.

В настоящее время применяется большое количество типов центробежных насосов различного назначения. Это насосы отечественного производства типов К (Км), Д, СЭ, Кс и т.д., а также насосы зарубежных фирм, например GRUNDFOS. По каждому из указанных типов разработана и выпускается широкая номенклатура различных номинальных производительностей и напоров, что позволяет в каждом конкретном случае подобрать требуемые характеристики.

Следует рассматривать в основном две возможные гидравлические схемы, в которых используются насосные установки. В первом случае это «проточные» схемы, в которых вода после насоса непосредственно разбирается из различных точек трубопроводной системы. Во втором – применяются циркуляционные системы, в которых водоразбор из трубопроводов не производится, или имеет незначительную величину. В дальнейшем будем рассматривать циркуляционные системы, широко распространенным примером которых являются водяные тепловые сети.

## **2. Регулирование насосов.**

Подбор и работа насосов производится в соответствии с гидравлическими характеристиками систем, для которых должен быть обеспечен требуемый расход теплоносителя или заданный уровень давлений. Это могут быть системы с постоянным или с переменным расходом перекачиваемой среды, связанным с изменением гидравлического сопротивления элементов. В реальной эксплуатации, как для тех, так и для других условий, как правило, необходимо регулирование параметров насосов, что обуславливается двумя факторами.

Во-первых, для циркуляционных систем с постоянным расходом воды, таких как, например системы отопления при их независимом присоединении к тепловым сетям, необходимость регулирования обуславливается дискретностью номинальных характеристик насосов, которые почти всегда не полностью соответствуют гидравлическим характеристикам систем. При этом за счет регулирования достигается требуемое соответствие, обеспечиваемое поддержанием необходимого перепада давлений на входе в систему или прямого поддержания заданного расхода.

Во-вторых, для систем с переменным гидравлическим сопротивлением элементов, определяющимся работой различных регуляторов (например, регуляторы температуры воды на горячее водоснабжение в системах теплоснабжения и т.д.) необходимость регулирования насосов обуславливается изменением гидравлических характеристик присоединенной системы и соответствующим изменением расхода перекачиваемой воды. В этом случае задачей регулирования является только поддержание заданного перепада давлений (располагаемого напора) в присоединенной системе.

При регулировании насосов в циркуляционных системах производится поддержание давления на всасе циркуляционных насосов за счет работы насосов подпитки. Требуемый перепад давлений в системе обеспечивается поддержанием давления после насосов в подающем трубопроводе.

Принципиально возможно применение трех основных способов регулирования насосов: это регулирование дросселированием части развиваемого напора, регулирование перепуском части воды с нагнетания на всас насосов (регулирование рециркуляцией) и регулирование изменением частоты вращения вала насосного агрегата. В качестве последнего в дальнейшем будет рассматриваться в основном частотное регулирование электродвигателя насоса (ЧРП).

Для понимания процесса организации регулирования при указанных способах, ниже приведены соответствующие диаграммы (графики) совместных характеристик насосов с учетом работы регуляторов и присоединенной сети. При этом режим работы циркуляционной системы (расход воды и перепады давлений) определяется точкой пересечения гидравлических характеристик насоса и сети.

Рассмотрим предварительно регулирование насоса при присоединении сети с постоянными гидравлическими сопротивлениями ее элементов. При этом задачей регулирования является обеспечение требуемого расхода, которое не всегда может быть непосредственно обеспечено насосом с выбранной характеристикой. Необходимый расход при этих условиях может устанавливаться как за счет использования регулятора расхода, так и поддержанием соответствующего располагаемого напора в присоединенной сети.

На рис.1 приведена условная схема циркуляционной системы с регулятором давления и постоянным гидравлическим сопротивлением сети, а также соответствующая диаграмма при регулировании дросселированием.

Как следует из рис. 1, при отсутствии регулятора давления точкой пересечения характеристики насоса и сети, обуславливающей режим работы циркуляционной системы без регулирования является точка *a*. При этом расход воды в сети будет превышать требуемое его значение, равное  $V_c$ . Наличие регулятора приводит к понижению располагаемого напора насоса на величину дросселирования в регуляторе и обуславливает работу системы в точке *б*, что обеспечивает установление требуемого расхода. Точка характеристики, в которой осуществляется работа самого насоса, соответствует при этом точке *в* диаграммы.

В этом случае (при постоянном сопротивлении сети) поддержание заданного перепада давлений  $\Delta H_c$  обеспечивает величину требуемого расхода. Для рассматриваемых условий вместо регулятора давления может быть использован

регулятор, непосредственно поддерживающий расход воды. Диаграмма параметров режимов при этом останется той же самой.

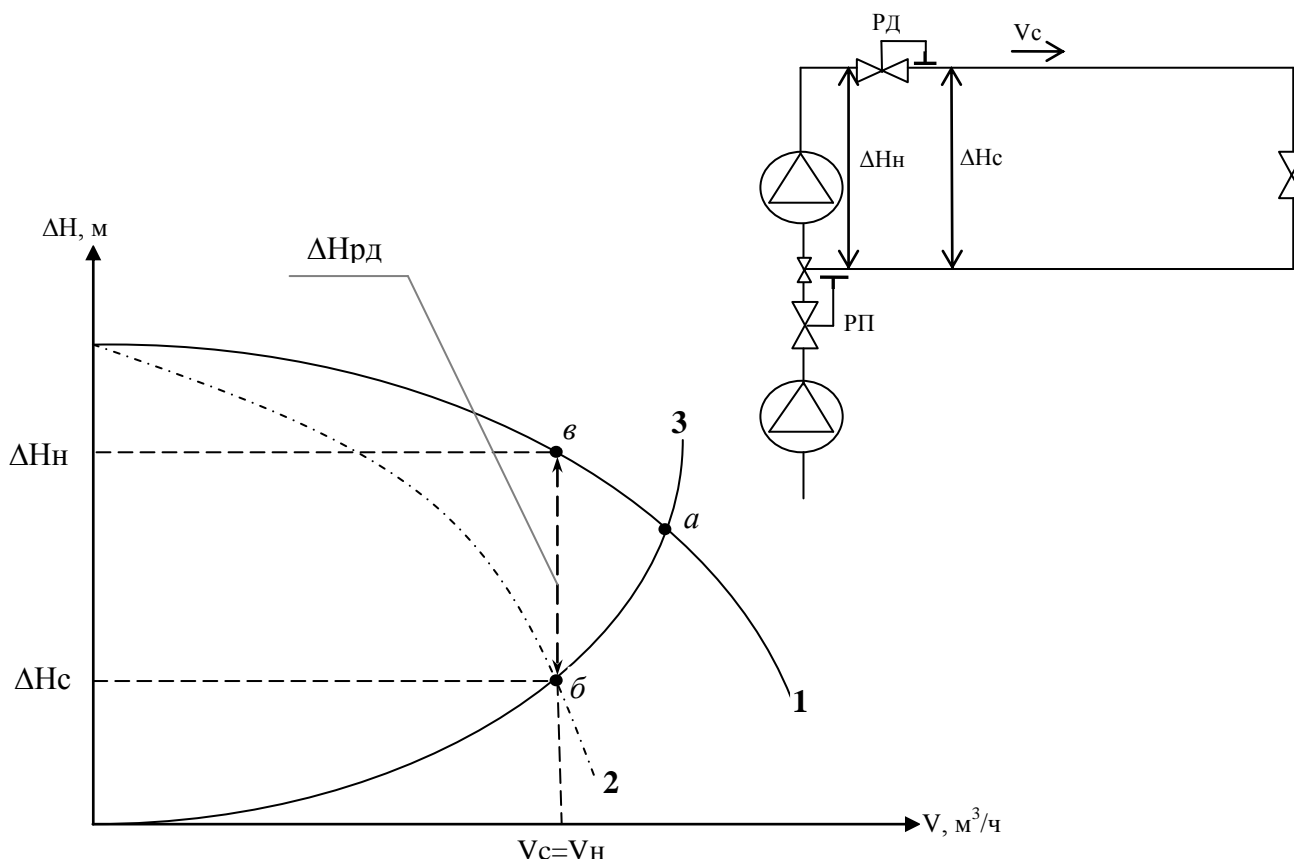


Рис. 1 Регулирование дросселированием

Условные обозначения:

- 1 – характеристика насоса
- 2 - характеристика насоса с регулятором
- 3 - характеристика сети
- РП – регулятор подпитки
- РД – регулятор давления

При дросселировании имеют место потери энергии связанные с регулированием и определяющиеся величиной дросселирования на регулирующем клапане  $\Delta H_{рд}$ .

Для анализа режимов и возможностей при регулировании рециркуляцией части воды с нагнетания на всас насоса, на рис.2 приведена аналогичная представленной ранее диаграмма режимов для такого регулирования при постоянном гидравлическом сопротивлении сети.

Как следует из рис.2, без регулятора режим работы циркуляционной системы будет соответствовать точке *a* диаграммы, и расход воды будет превышать требуемое значение  $V_c$ . Открытие клапана регулятора на линии рециркуляции позволит увеличить расход воды через насос и снизить в соответствии с характеристикой его развиваемый напор, доводя тем самым расход воды в сети до требуемого. Открытие клапана приводит к работе насоса на сеть с другой, отличной от присоединенной сети характеристикой. При этом режим насоса соответствует точке *в* на диаграмме, а режимы работы собственно присоединенной сети отображаются точкой *б*.

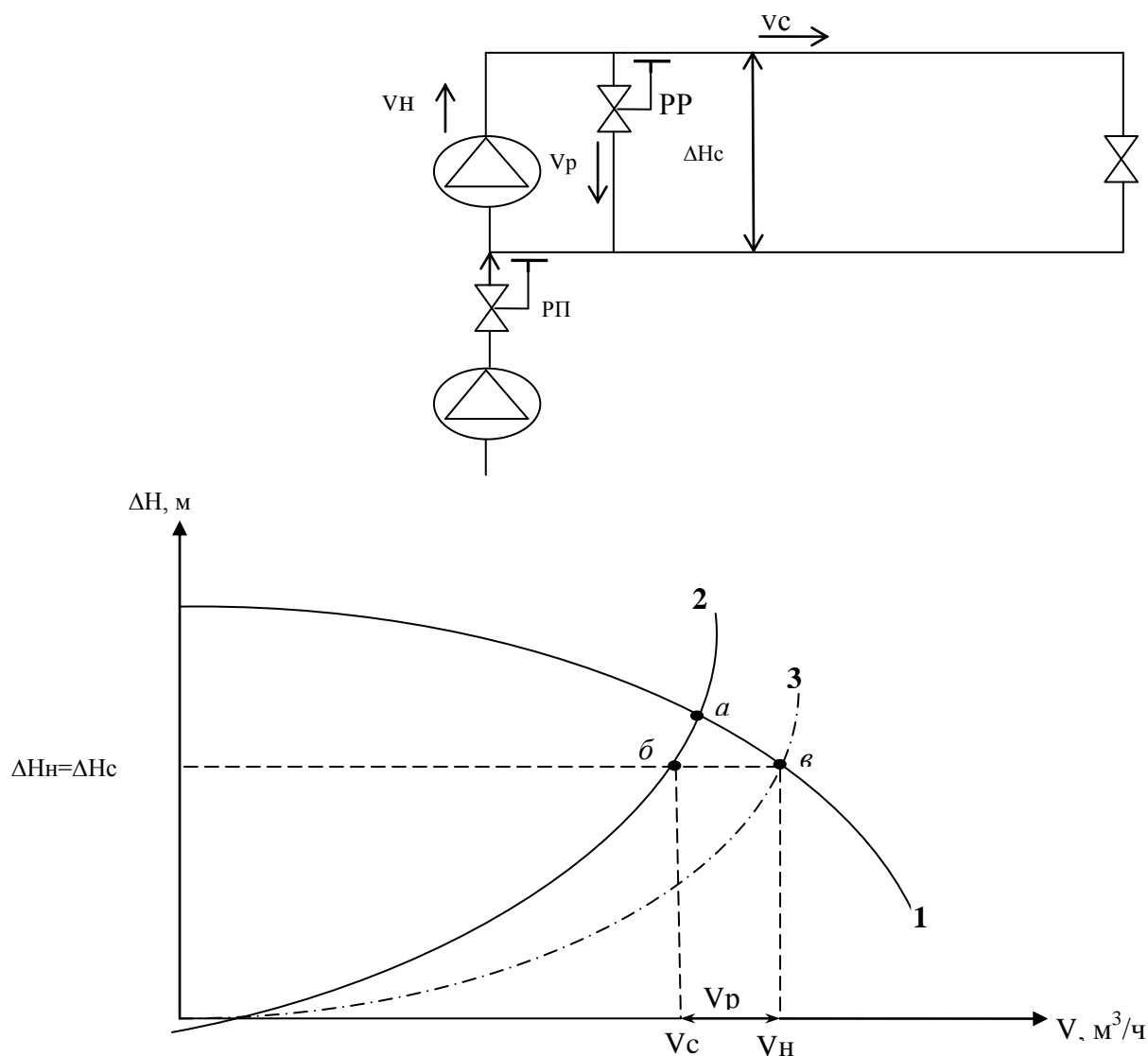


Рис. 2 Регулирование рециркуляцией

Условные обозначения:

**2** – характеристика сети

**3** - характеристика сети с учетом регулятора

$PP$  – регулятор рециркуляции

Остальные обозначения см. рис.1

При постоянном гидравлическом сопротивлении сети поддержание регулятором заданного перепада давлений  $\Delta H_c$ , также как и в предыдущем варианте регулирования, обеспечивает требуемую величину расхода. Для этих целей на линии рециркуляции вместо регулятора давления может быть установлен регулятор, непосредственно поддерживающий постоянным расход воды в сети  $V_c$ . При рециркуляции, на насосе имеют место дополнительные затраты электроэнергии, связанные с регулированием и обусловленные перекачкой дополнительного расхода воды через линию рециркуляции  $V_p$ .

При регулировании параметров насоса изменением частоты вращения вала электродвигателя изменяется собственно характеристика насоса, которая получается практически параллельным переносом исходной характеристики, соответствующей номинальной частоте вращения вала.

Диаграмма параметров режима работы для такого способа регулирования приведена на рис. 3.

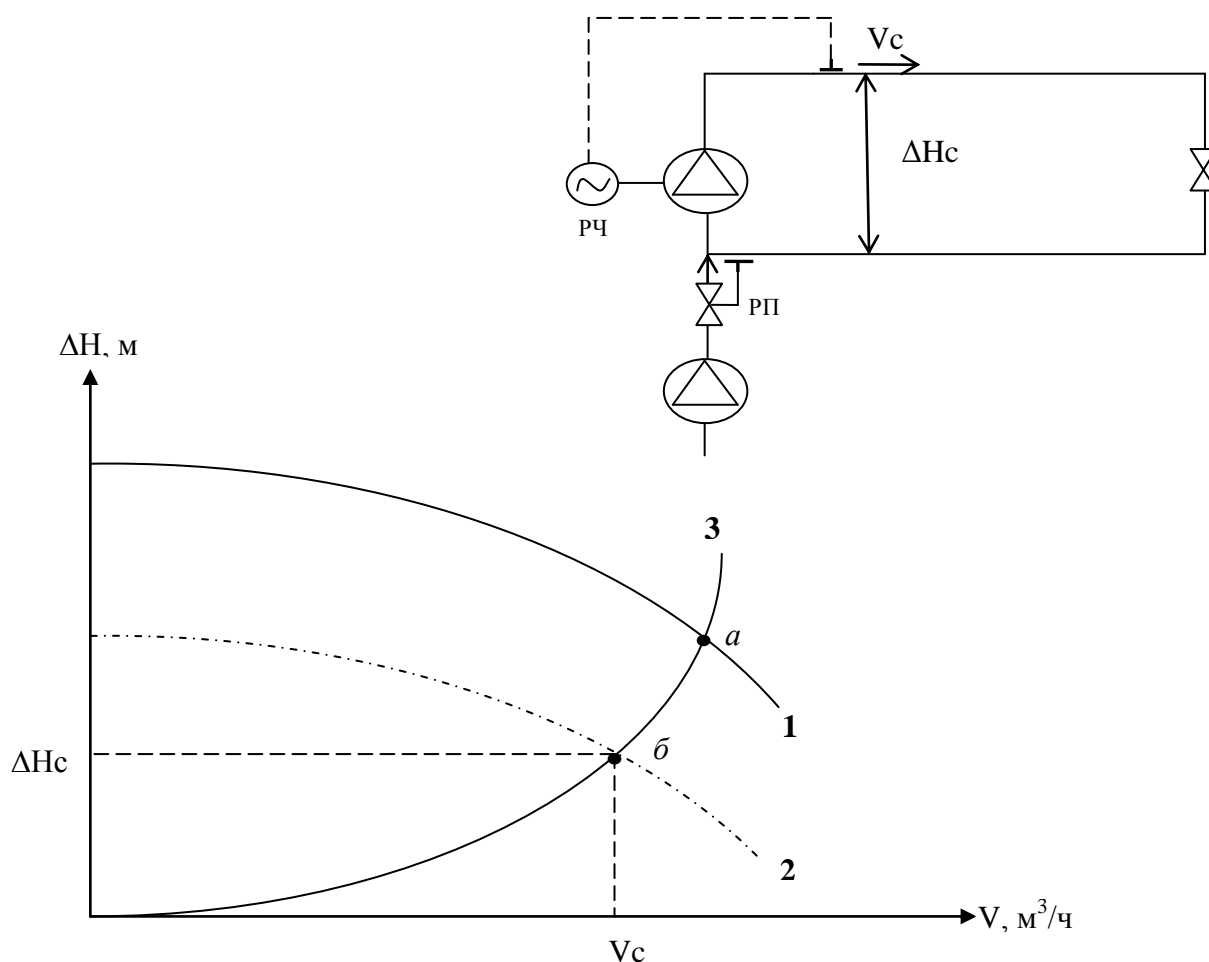


Рис. 3 Регулирование изменением частоты вращения

Условные обозначения:

1 – характеристика насоса при номинальной частоте

2 - характеристика насоса при пониженной частоте

3 - характеристика сети

РЧ – регулятор частоты

Как следует из рис., без учета регулирования режим работы сети и насоса соответствует точке *a* и расход воды больше требуемого значения  $V_c$ . Использование частотного регулятора обеспечивает такое изменение характеристики насоса, при котором ее пересечение с характеристикой сети соответствует точке *б*, в которой расход воды в системе соответствует требуемому. При этом точка *б* принадлежит новой характеристике насоса (характеристике при сниженной частоте) и потери мощности на регулирование при этом практически отсутствуют.

Обеспечение требуемого расхода воды в присоединенной сети за счет регулирования приводит к дополнительным потерям энергии, за исключением способа частотного регулирования. Следует отметить, что частотные регуляторы в настоящее время являются достаточно дорогим оборудованием, поэтому в качестве менее затратного мероприятия по обеспечению расхода для сетей с постоянным гидравлическим сопротивлением следует рассматривать возможность обрезки рабочего колеса насоса для обеспечения приемлемого

совпадения характеристики насоса и присоединенной циркулярной системы или использование гидромуфт, которые также как и ЧРП позволяют изменять частоту вращения вала, хотя и с меньшим диапазоном регулирования. Стоимость установки гидромуфты существенно дешевле использования частотного регулятора. Возможно также изменение гидравлических характеристик системы под характеристику насоса. В тепловых сетях это обеспечивается разработкой и проведением наладочных мероприятий.

### 3. Оценка требуемой мощности при регулировании насосов.

Применение того или иного способа регулирования насосов требует расчета возникающих при этом затрат, связанных с процессом регулирования и их соотношении с затратами на регулирующее оборудование.

При сопоставлении методов регулирования основной статьей эксплуатационных расходов является затраты связанные с потреблением электроэнергии. Поэтому ниже приводятся основные подходы к определению величины потребляемой электроэнергии, связанной с мощностью на привод насосов и сопоставлением мощностей для различных способов регулирования.

Величина потребляемой мощности насосов  $N$ , кВт определяется по приведенной ниже формуле:

$$N = \frac{\Delta H_n * V_n * \rho * 10^{-3}}{367 * \eta_n * \eta_3} \quad (1)$$

где:  $\Delta H_n$  – развиваемый насосом напор, м;  
 $V_n$  – расход воды при развиваемом напоре, м<sup>3</sup>/ч;  
 $\rho$  – плотность перекачиваемой воды, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\eta_n$  – КПД насоса;  
 $\eta_3$  – КПД электродвигателя.

Формула (1) может быть представлена в следующем упрощенном виде:

$$N = K * \frac{\Delta H_n * V_n}{\eta_{на}} \quad (2)$$

где:  $K$  – размерный коэффициент;  
 $\eta_{на}$  – общий КПД насосного агрегата.

Из (2) следует, что геометрической интерпретацией величины потребляемой насосом мощности является эквивалент выделяемой на графике гидравлической характеристики насоса площади прямоугольника со сторонами, равными соответственно  $\Delta H$  и  $V_n$ , которые определяются рабочей точкой характеристики насоса при данном режиме.

Гидравлическая характеристика насоса в аналитической форме достаточно точно может быть представлена квадратичным трехчленом в виде:

$$\Delta H_n = A * V_n^2 + B * V_n + C, \text{ м} \quad (3)$$

где:  $A$ ,  $B$  и  $C$  – коэффициенты уравнения характеристики, которые могут быть определены по трем произвольным точкам графика характеристики насоса.

Для учета изменения характеристики насоса с учетом частоты вращения может быть предложена следующая формула, основывающаяся на условиях подобия:

$$\Delta H_N = A * V_N^2 + B * V_N * (n/n_N) + C * (n/n_N)^2, \text{ м} \quad (4)$$

где:  $n$  – текущая частота вращения ротора, 1/с (об/мин);

$n_N$  – номинальная частота вращения, 1/с (об/мин).

С учетом погрешности аппроксимации значение коэффициента  $C$  примерно соответствует напору насоса при нулевом расходе. При полого падающей характеристике коэффициенты  $A$  и  $B$  всегда отрицательны, и по абсолютной величине на 2 и более порядков меньше величины  $C$ . В соответствии с (3) формула для расчета мощности насоса может быть также представлена в виде:

$$N = C * \frac{V_N * \rho * 10^{-3}}{367 * \eta_n * \eta_\varepsilon} - B * \frac{V_N^2 * \rho * 10^{-3}}{367 * \eta_n * \eta_\varepsilon} - A * \frac{V_N^3 * \rho * 10^{-3}}{367 * \eta_n * \eta_\varepsilon}, \text{ кВт.}$$

Из последней формулы следует, что без учета влияния КПД при принятых выше условиях потребляемая насосом мощность увеличивается с возрастанием расхода за счет увеличения первого слагаемого, однако с учетом второго и третьего слагаемых темп возрастания снижается. Т. е. рост расхода приводит к увеличению потребляемой насосом мощности.

Следует отметить, что изменение мощности насоса хорошо может быть аппроксимировано линейной зависимостью от расхода перекачиваемой воды и представлено формулой:

$$N = N_x + \alpha * V_N, \quad (5)$$

где:  $N_x$  – мощность холостого хода, кВт;

$\alpha$  – коэффициент пропорциональности, для центробежных насосов всегда больший 1.

В соответствии с (1) и условными обозначениями из рис. 1 величина мощности насоса при регулировании дросселированием  $N_d$  может быть представлена следующим образом:

$$N_d = \frac{\Delta H_N * V_N * \rho * 10^{-3}}{367 * \eta_{нд} * \eta_\varepsilon} = \frac{\Delta H_c * V_c * \rho * 10^{-3}}{367 * \eta_{нд} * \eta_\varepsilon} + \frac{\Delta H_{др} * V_c * \rho * 10^{-3}}{367 * \eta_{нд} * \eta_\varepsilon}, \quad (6)$$

где:  $\eta_{нд}$  – КПД насоса при режиме, соответствующем условиям его работы при дросселировании.

В (6) первое слагаемое представляет собой полезную мощность, непосредственно затраченную на перекачку воды по присоединенной сети. Второе слагаемое связано с потерями на преодоление дросселирования в регулирующем клапане и является затратами мощности на регулирование.

Аналогично, для регулирования рециркуляцией, в соответствии с условными обозначениями из рис. 2 величина мощности насоса  $N_p$  может быть определена по формуле:

$$N_p = \frac{\Delta H_N * V_N * \rho * 10^{-3}}{367 * \eta_{np} * \eta_\varepsilon} = \frac{\Delta H_c * V_c * \rho * 10^{-3}}{367 * \eta_{np} * \eta_\varepsilon} + \frac{\Delta H_c * \Delta V_p * \rho * 10^{-3}}{367 * \eta_{np} * \eta_\varepsilon}, \quad (7)$$

где:  $\eta_{np}$  – КПД насоса в рабочей точке при суммарном расходе воды через насос.

Первое слагаемое в формуле (7), также как и при регулировании дросселированием, представляет собой полезную мощность, а второе – потери мощности, связанные с регулированием.

Мощность насоса при ЧРП в соответствии с условными обозначениями из рис. 3 может быть представлена в виде:

$$N_{\text{ч}} = \frac{\Delta H_{\text{с}} * V_{\text{с}} * \rho * 10^{-3}}{367 * \eta_{\text{нч}} * \eta_{\text{э}} * \eta_{\text{чр}}} \quad (8)$$

где:  $\eta_{\text{нч}}$  – КПД насоса в рабочей точке измененной характеристики;  
 $\eta_{\text{чр}}$  – КПД самого частотного регулятора.

Величина затрачиваемой мощности на насосный агрегат при частотном регулировании практически соответствует полезной мощности на перекачку воды по сети с расходом  $V_{\text{с}}$ . Следует отметить, что величина КПД частотного регулятора определяется свойствами регулирующей аппаратуры и может приниматься постоянной на уровне 0.95 – 0.98.

КПД насоса для частотного регулирования  $\eta_{\text{нч}}$  при различных режимах может приниматься равной величине КПД в точке, соответствующей характеристике насоса с номинальной частотой при постоянном гидравлическом сопротивлении сети, которая отображается точкой  $a$  на рис. 3

Затрачиваемая на привод насосов мощность различна при рассматриваемых способах регулирования и зависит от разных параметров. Для оценки эффективности регулирования важно определить соотношение затрачиваемой мощности при разных способах регулирования, и в особенности оценить дополнительные затраты мощности на регулирование. Геометрическая интерпретация (качественная оценка) соотношения мощностей при разных способах может быть получена на основе сопоставления графиков работы при рассматриваемых способах, основанных на графиках гидравлических характеристик насоса с различным регулированием и присоединенной циркуляционной системы. Такой общий график приведена на рис. 4.

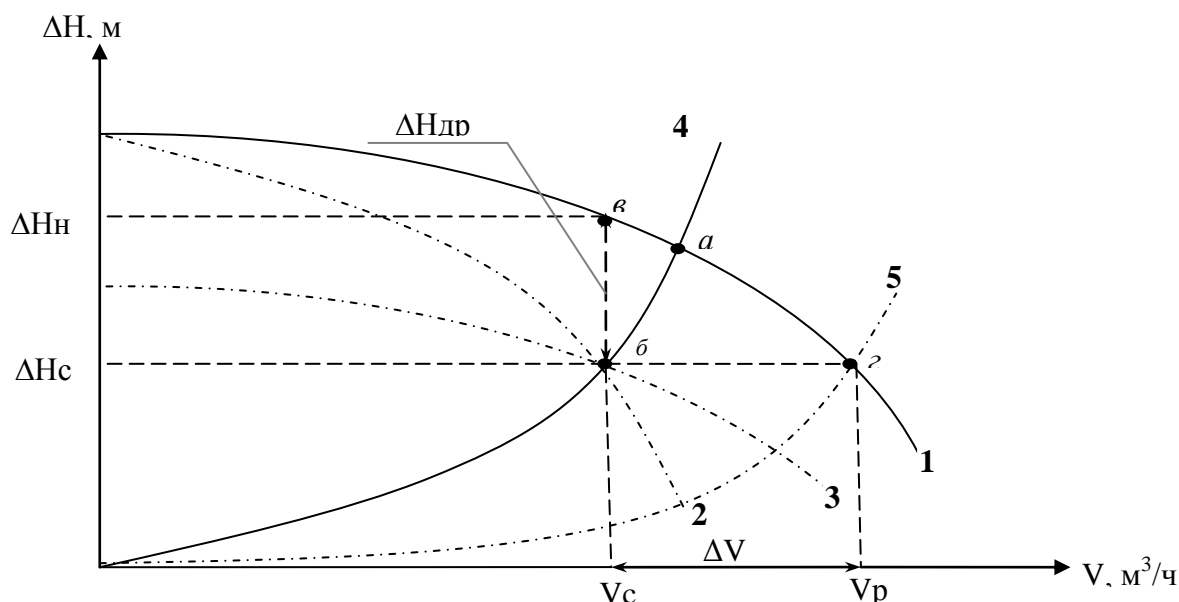


Рис. 4 Сопоставление способов регулирования

Условные обозначения:

- 1 – характеристика насоса
- 2 - характеристика насоса с регулятором при дросселировании
- 3 - характеристика насоса при частотном регулировании
- 4 – характеристика циркуляционной системы
- 5 - характеристика циркуляционной системы с регулятором при рециркуляции



На этом рис. показана номинальная характеристика насоса и характеристика присоединенной системы, а также характеристика насоса с регуляторами при разных способах регулирования, обеспечивающими работу системы с расходом воды  $V_c$ .

Полезная мощность, затрачиваемая на прокачку воды, как уже отмечалось, определяется площадью прямоугольника с сторонами  $\Delta H_c$  и  $V_c$ , что соответствует затратам мощности при частотном регулировании. Дополнительные затраты мощности насоса при регулировании дросселированием соответствуют площади прямоугольника со сторонами  $\Delta H_{др}$  (отрезок между точками *в* и *б*) и  $V_c$ . Потери мощности при регулировании рециркуляцией отображаются прямоугольником со сторонами  $\Delta H_c$  и  $\Delta V_p$  (отрезок между точками *б* и *г*).

Важное значение для оценки эффективности регулирования имеет возможность количественного определения дополнительных затрат электроэнергии связанных с регулированием при различных методах. Ниже приводятся формулы для расчета этой дополнительной мощности.

Как следует из приведенного ранее, наиболее эффективным является частотное регулирование, поэтому сопоставление проводится по отношению к этому методу. Сопоставление будет проводиться для условий рис. 4, т.е. при одинаковых насосах (одинаковые гидравлические характеристики и, соответственно, одинаковые коэффициенты уравнения характеристики), а также одинаковых гидравлических сопротивлений присоединяемой циркуляционной системы трубопроводов.

Для сопоставления регулирования рециркуляцией и ЧРП, исходя из (7) и (8) может быть получено следующее выражение для разницы мощностей при указанных способах регулирования:

$$\Delta N_{рч} = N_p - N_{ч} = \frac{\Delta H_c * V_c}{367 * \eta_{нр}} * (1 - \eta_{нр}/\eta_{нч}) + \frac{\Delta H_c * \Delta V_p}{367 * \eta_{нр}}, \quad (9)$$

где:  $\eta_{нр}$  – КПД насосного агрегата при режиме насоса с рециркуляцией;  
 $\eta_{нч}$  – КПД насосного агрегата и частотного регулятора при ЧРП.

В формуле (9) основное увеличение затрат мощности на регулирование определяет второе слагаемое, зависящее при заданном располагаемом напоре присоединенной сети от величины рециркулируемого расхода. Первое слагаемое имеет заведомо меньшую величину и определяется соотношением КПД в расчетной точке и в точке с увеличенным расходом воды через насос при рециркуляции.

С учетом последнего, а также исходя из того условия, что величина  $1 - \eta_{нр}/\eta_{нч}$  практически всегда больше 0, величина  $\Delta N_{рч}$  всегда положительна (в частном случае равна нулю) и требуемая мощность при регулировании рециркуляцией всегда больше чем при ЧРП.

Для сопоставления регулирования дросселированием и ЧРП, исходя из (6) и (8), может быть получено следующее выражение для разницы мощностей при указанных способах регулирования:

$$\Delta H_c * V_c \qquad \Delta H_{др} * V_c$$

$$\Delta N_{\text{дч}} = N_{\text{д}} - N_{\text{ч}} = \frac{\quad}{367 * \eta_{\text{нд}}} * (1 - \eta_{\text{нд}}/\eta_{\text{нч}}) + \frac{\quad}{367 * \eta_{\text{нд}}}, \quad (10)$$

где:  $\eta_{\text{нд}}$  – КПД насосного агрегата при режиме насоса с дросселированием.

В (10) основные затраты мощности на регулирование также определяет второе слагаемое, зависящее при заданном расходе в присоединенной сети от величины дросселирования развиваемого насосом напора. Первое слагаемое имеет заведомо меньшую величину и может быть близко к нулю при равенстве соответствующих КПД. Величина  $\Delta N_{\text{дч}}$  всегда положительна (в частном случае равна нулю) и требуемая мощность при регулировании дросселированием всегда больше чем при использовании ЧРП.

Из приведенного следует, что величина требуемой мощности при использовании ЧРП насоса практически всегда больше этой мощности при других способах регулирования. В соответствии с этим целесообразно рассмотреть соотношение мощностей при сопоставлении регулирования рециркуляцией и дросселированием. Поскольку использование для регулирования метода рециркуляции воды приводит к необходимости работы насоса с заведомо большим расходом (точка  $z$  на рис. 4), чем это требуется для присоединенной сети, то предварительно можно сказать, что требуемая мощность насоса при регулировании рециркуляцией будет превышать ее величину при регулировании дросселированием.

Численное значение разницы требуемых мощностей при регулировании дросселированием по сравнению с использованием рециркуляции может быть получено на основании соответствующих выражений для расчета мощности при этих способах. Из формул (6) и (7) с учетом упрощений из (2) получим требуемое соотношение мощностей:

$$\Delta N_{\text{рд}} = N_{\text{р}} - N_{\text{д}} = K * \frac{\Delta N_{\text{с}} * V_{\text{р}}}{\eta_{\text{нр}}} - K * \frac{\Delta N_{\text{н}} * V_{\text{с}}}{\eta_{\text{нд}}}, \text{ кВт} \quad (11)$$

Величина  $\Delta N_{\text{рд}}$ , как следует из (13), зависит от многих показателей и не позволяет наглядно показать соотношение требуемых мощностей при рассматриваемых способах регулирования. Однозначное сравнение этих способов может быть получено при использовании зависимости требуемой мощности от перекачиваемого расхода в соответствии с (5).

Так при регулировании дросселированием требуемая мощность будет составлять:

$$N_{\text{д}} = N_{\text{х}} + \alpha * V_{\text{с}}.$$

При регулировании рециркуляцией требуемая мощность определяется формулой:

$$N_{\text{р}} = N_{\text{х}} + \alpha * (V_{\text{с}} + \Delta V_{\text{р}}).$$

Тогда разность мощностей  $\Delta N_{\text{рд}}$  для этих способов будет определяться выражением:

$$\Delta N_{\text{рд}} = \alpha * \Delta V_{\text{р}}, \quad (12)$$

которое, при  $\alpha > 1$ , однозначно показывает, что для одних и тех же условий требуемая мощность при регулировании рециркуляцией всегда превышает

мощность при регулировании дросселированием, которое является энергетически более эффективным.

### 3.1 Регулирование при переменных расходах.

Более сложные условия по регулированию параметров насосов будут иметь место для регулируемых сетей, т.е. циркуляционных систем с переменным гидравлическим сопротивлением элементов, например для тепловых сетей с регуляторами температуры на горячее водоснабжение и отпуска тепла на отопление. Для рассматриваемой системы насос-сеть это выражается в перекачке сетевым насосом определяемого потребителем различного расхода воды. В этом случае, задачей регулирования как правило является обеспечение требуемого располагаемого напора на присоединенной сети или давления после насоса, при наличии регулятора подпитки. В отличие от предыдущих условий, в этом случае вопросы организации регулирования становятся более значимыми, поскольку не могут быть решены только подбором характеристик применяемых насосов.

При рассматриваемых условиях также можно использовать указанные выше способы регулирования: дросселированием, рециркуляцией и изменением частоты вращения вала насоса.

Диаграмма параметров режимов системы насос-сеть для регулирования дросселированием насоса при переменном расходе воды приведена на рис. 5. На этом же рис. приведена принципиальная схема рассматриваемой системы.

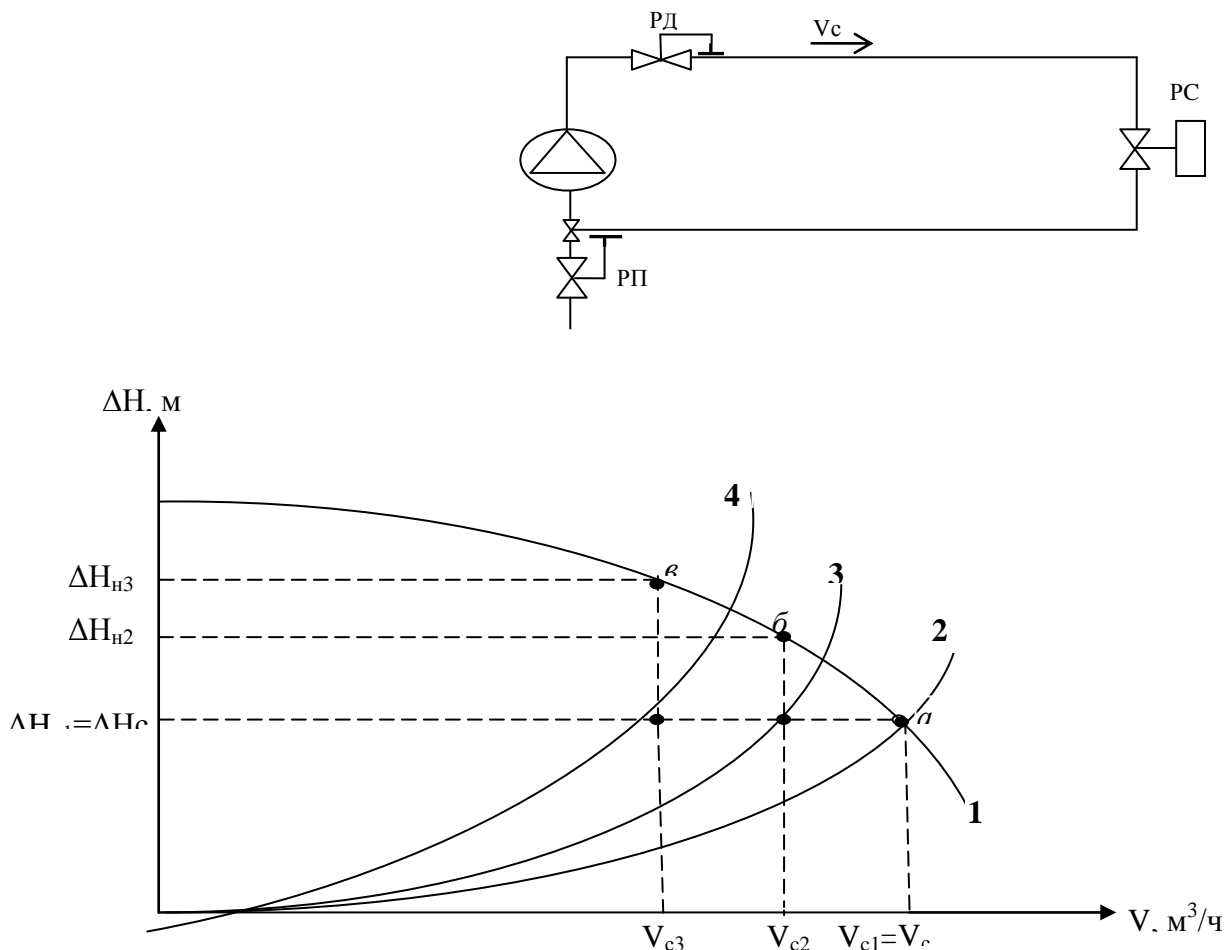


Рис. 5 Регулирование дросселированием при переменном расходе

В соответствии с рис. 5 наибольший расход воды  $V_c=V_{pc}$  будет иметь место при полностью открытом регуляторе в присоединенной сети (РС). В этом случае совместный режим работы насоса и сети характеризуется точкой *a* на характеристике насоса. Такой режим является расчетным для определения требуемых параметров и выбора насоса. Предполагается, что для этого режима дросселирование развиваемого напора не производится. При двух других расходах на рис. 5, определяемых работой регулятора сети РС, развиваемые насосом напоры в соответствии с его характеристикой являются избыточными. Это требует снижения напоров до заданной для тепловой сети величины  $\Delta H = \Delta H_c$ , что обеспечивается работой регулятора, увеличивающего свое гидравлическое сопротивление и, соответственно, величину дросселирования.

Для таких условий оценка эффективности регулирования насоса должна проводиться по суммарной величине потребления электроэнергии при известной продолжительности  $z_i$ , рассматриваемых режимов. Для приведенной на рис.5 системы величина потребления электроэнергии  $\text{Эд}$  может быть определена по формуле:

$$\begin{aligned} \text{Эд} &= K * \frac{\Delta H_{H1} * V_{c1}}{\eta_{на1}} * z_1 + K * \frac{\Delta H_{H2} * V_{c2}}{\eta_{на2}} * z_2 + K * \frac{\Delta H_{H3} * V_{c3}}{\eta_{на3}} * z_3 = \\ &= K * \frac{\Delta H_c * V_{pc}}{\eta_{на1}} * z_1 + K * \frac{(\Delta H_c + \Delta H_{др2}) * V_{c2}}{\eta_{на1}} * z_2 + K * \frac{(\Delta H_c + \Delta H_{др3}) * V_{c3}}{\eta_{на2}} * z_3 = \\ &= K * \Delta H_c \left( \frac{V_{pc}}{\eta_{нар}} * z_1 + \frac{V_{c2}}{\eta_{на2}} * z_2 + \frac{V_{c3}}{\eta_{на3}} * z_3 \right) + K * \frac{\Delta H_{др2} * V_{c2}}{\eta_{на2}} * z_2 + K * \frac{\Delta H_{др3} * V_{c3}}{\eta_{на3}} * z_3. \end{aligned} \quad (13)$$

В этой формуле первое слагаемое представляет собой полезные затраты электроэнергии на перекачку сетевой воды. Второе и третье слагаемые составляют затраты энергии на регулирование и связаны с дросселированием избыточного напора.

Диаграмма режимов насос-сеть при регулировании рециркуляцией вместе с схемой соответствующей сети приведена на рис. 6.

Для этой схемы расчетный расход воды является максимальным, который можно получить при полном открытии регулятора в сети РС. Другие, сниженные расходы формируются при закрытии указанного регулятора и снижении гидравлического сопротивления присоединенной сети.

Применительно к насосной установке условия расчетного режима соответствуют полному закрытию регулятора РР в линии рециркуляции и для этого режима должны подбираться характеристики насоса.

Закрытие регулятора сети при других режимах приводит к увеличению гидравлического сопротивления циркуляционной системы и снижению расхода воды в сети. При этом регулятор рециркуляции открывается, обеспечивая поддержание заданного располагаемого напора путем поддержания постоянства расхода воды через насос. Сам насос при этом способе регулирования все время работает в одной точке характеристики.

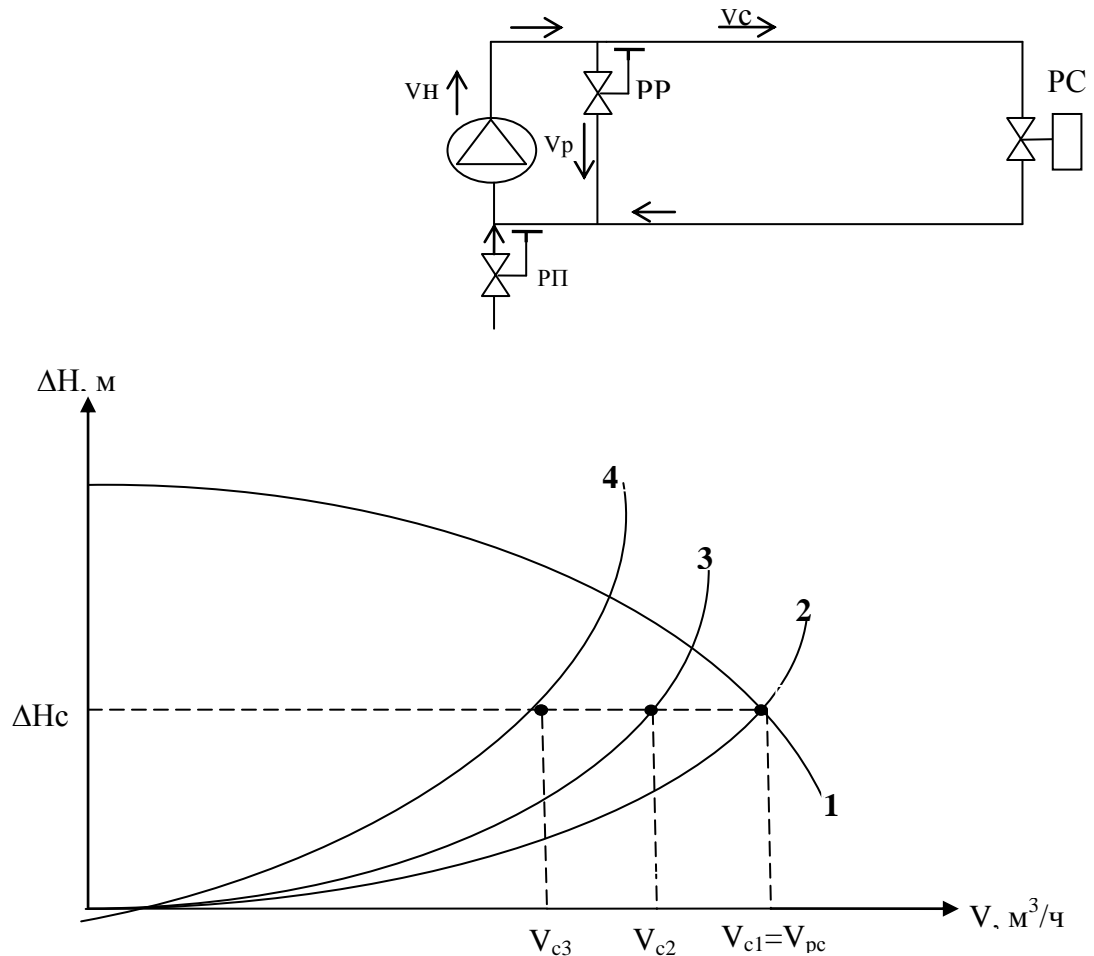


Рис. 6 Регулирование рециркуляцией при переменном расходе

При регулировании рециркуляцией затраты электроэнергии на привод насоса определяются формулой:

$$\begin{aligned}
 \text{Эр} &= K * \frac{\Delta H_H * V_H}{\eta_{на}} * (z_1 + z_2 + z_3) = K * \frac{\Delta H_c * V_{pc}}{\eta_{на}} * (z_1 + z_2 + z_3) = \\
 &= K * \frac{\Delta H_c * V_{pc}}{\eta_{на}} * z_1 + K * \frac{\Delta H_c * (V_{pc} + \Delta V_{p2})}{\eta_{на}} * z_2 + K * \frac{\Delta H_c * (V_{pc} + \Delta V_{p3})}{\eta_{на}} * z_3 = \\
 &= K * \frac{\Delta H_c * V_{pc}}{\eta_{на}} * (z_1 + z_2 + z_3) + K * \frac{\Delta H_c}{\eta_{на}} * (\Delta V_{p2} * z_2 + \Delta V_{p3} * z_3) \quad (14)
 \end{aligned}$$

В этой формуле, также как и в предыдущем случае, первое слагаемое представляет собой полезные затраты энергии на перекачку воды при расходе  $V_{pc}$ , а второе и третье слагаемые являются затратами электроэнергии, связанными с регулированием и определяющимися перекачкой дополнительного расхода рециркуляции. При рассматриваемом способе регулирования производится работа насоса с наибольшими расходами воды. В соответствии с этим, можно сделать вывод о больших затратах электроэнергии на перекачку,

требуемых при реализации способа регулирования рециркуляцией, чем при регулировании дросселированием напора.

При использовании ЧРП насоса обеспечение требуемого располагаемого напора при переменном расходе воды производится изменением характеристики этого насоса производимого изменением частоты вращения ротора в соответствии с формулой (8). Диаграмма параметров режимов насос-сеть для рассматриваемого способа регулирования приведена на рис. 7.

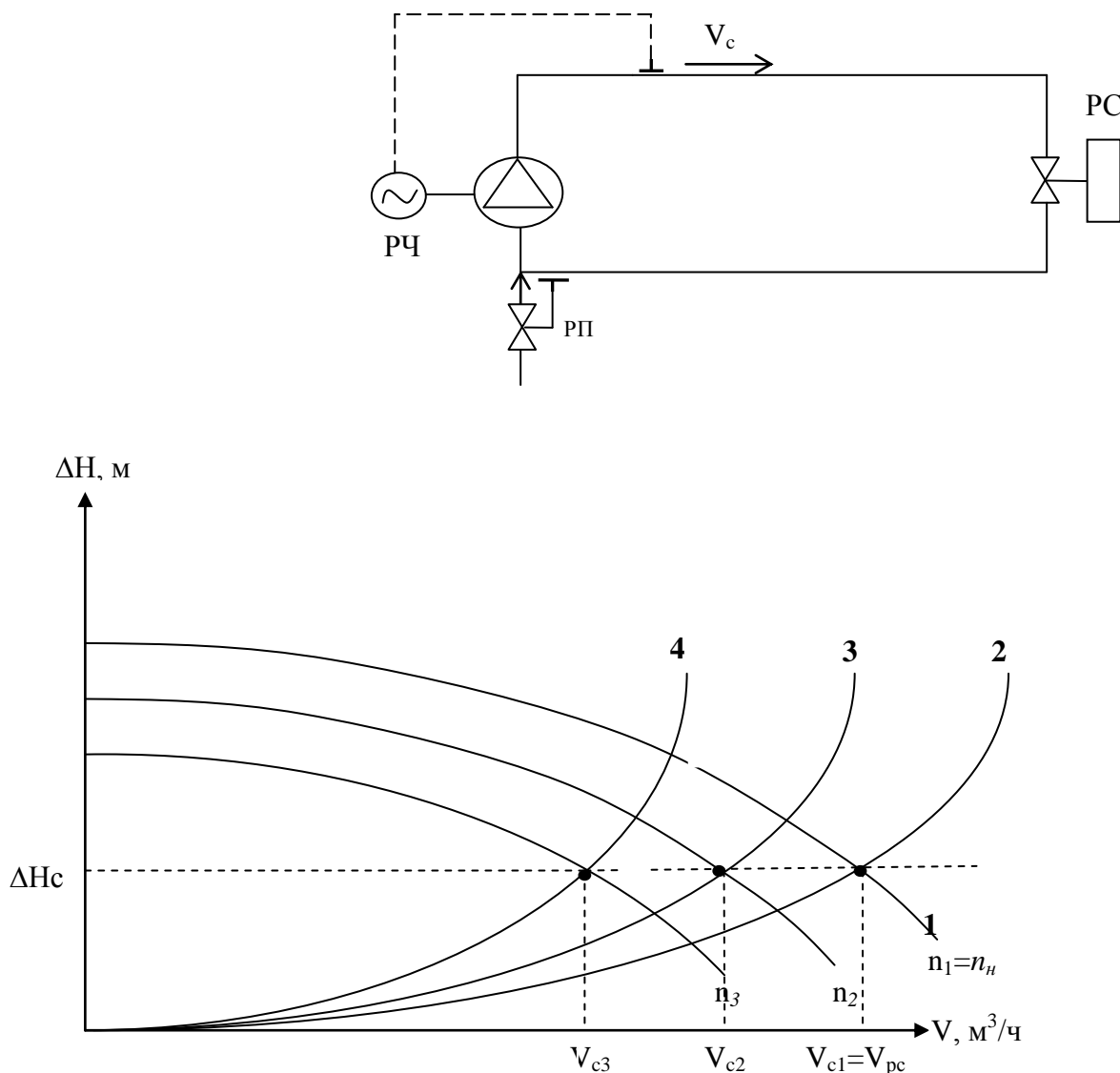


Рис 7 Частотное регулирование при переменном расходе воды в сети

В соответствии с рис. 7 потребление электроэнергии на привод насоса может быть представлено формулой:

$$\begin{aligned}
 \text{Эч} &= K * \frac{\Delta H_c * V_{pc}}{\eta_{на}} * z_1 + K * \frac{\Delta H_c * V_{c2}}{\eta_{на}} * z_2 + K * \frac{\Delta H_c * V_{c3}}{\eta_{на}} * z_3 = \\
 &= K * \frac{\Delta H_c}{\eta_{на}} * (V_{pc} * z_1 + V_{c2} * z_2 + V_{c3} * z_3)
 \end{aligned} \tag{15}$$

В этой формуле каждое из слагаемых представляет собой затраты электроэнергии на перекачку воды по тепловой сети без дополнительных затрат на проведение регулирования. При этом КПД насосного агрегата может быть принят одинаковым для всех режимов, что справедливо при частотном регулировании. Т.е. частотное регулирование насоса при переменном расходе воды в сети также является наиболее энергетически предпочтительным по величине затрат электроэнергии на перекачку за счет отсутствия потерь на регулирование. При незначительных изменениях расхода эффективную конкуренцию частотному регулированию может составить использование гидромффт, что по стоимости оборудования существенно дешевле частотных регуляторов.

Как следует из приведенного, при сопоставлении методов регулирования насоса в условиях его работы на сеть с переменным расходом имеют место те же соотношения затрат электроэнергии, что и соотношения требуемых мощностей при регулировании насосов для систем с постоянным расходом.

### 3.2 Условия регулирования параллельной группы насосов.

При больших расходах воды в тепловой сети мощности одного насоса не достаточно и на источниках тепла, как правило, устанавливают несколько насосов, работающих параллельно. Установка нескольких насосов требуется также по условиям надежности теплоснабжения.

Регулирование режима работы насосной группы при этом также должно осуществляться по располагаемому напору или по давлению на напорном коллекторе насосной станции одним из рассматриваемых выше способов.

При регулировании группы насосов следует учитывать обеспечение условий надежности работы системы и, в частности, работы насосов в условиях регулирования. С этой точки зрения следует различать реализацию способов регулирования по месту установки регулирующего органа и характеру его воздействия на работу насосов в сети. Так возможны две схемы реализации рассматриваемых способов регулирования. При первом из них регулирующее воздействие производится по суммарному потоку воды в напорных трубопроводах насосной группы. При втором – регулирующее воздействие осуществляется на одном из насосов, другие насосы несут базовую нагрузку.

Использование дросселирования общего расхода воды после насосной группы требует повышенного качества регуляторов и регулирующих клапанов, устанавливаемых на основном напорном трубопроводе, поскольку выход из строя такого регулятора может привести к недопустимым гидравлическим режимам в присоединенной системе, обусловленным неправильной работой регулятора. В этом смысле более предпочтительным является использование регулирования рециркуляцией, при которой регулирующий клапан устанавливается на перепускной линии, и при выходе регулятора из строя может быть отключен с переводом насосной группы на ручное регулирование.

Организация частотного регулирования также может осуществляться целиком для насосной группы. При этом изменение частоты производится одновременно у электродвигателей всех насосов. Для такой схемы регулирования

выход из строя частотного регулятора или сбои в программном обеспечении регулирующего контроллера приводит к нарушению гидравлического режима присоединенной циркулярной системы.

Режимы работы и затраты электроэнергии на перекачку при указанных выше условиях мало отличаются от аналогичных показателей для одного насоса при каждом способе регулирования. Однако определение режимных показателей в системе насос-сеть будет производиться по суммарной характеристике насосов построенной для параллельного их подключения. Затраты электроэнергии будут суммироваться по всем работающим насосам с равномерным распределением расходов воды по агрегатам. Основной сложностью при этом будет являться определение количества работающих насосов, которое может меняться при существенном изменении расходов воды в присоединенной сети.

При организации регулирования с использованием для этих целей по одному из насосов в группе, когда регулятор давления устанавливается только на регулируемый насос или только этот насос оснащается регулятором ЧРП, а остальные насосы обеспечивают базовую нагрузку, надежность работы системы повышается за счет возможности перехода на ручное регулирование. При этом в насосной группе может быть предусмотрено по два регулируемых насоса, которые обеспечивают их взаимное резервирование, что еще больше повышает надежность обеспечения гидравлических режимов системы.

В этом случае определение режимных показателей и расчет затрат мощности существенно усложняется и может быть произведен путем разработки режимных карт загрузки оборудования, в которых в табличном виде представлены состав и состояние насосного оборудования по потребляемому току в зависимости от расходов воды через насосную группу. Методика составления режимных карт, используемые для этого подходы и требуемые исходные данные при различных способах регулирования приведена в /1/.

#### 4. Сопоставление методов регулирования отпуска тепла в тепловых сетях

Наиболее мощными и протяженными циркуляционными системами являются тепловые сети систем централизованного теплоснабжения.

В настоящее время в тепловых сетях по ряду экономических и технических причин принят метод центрального качественного регулирования отпуска тепла. Это связано в первую очередь с тем, что основной нагрузкой является сезонная нагрузка отопления, зависящая от температуры наружного воздуха, а отпуск тепла производится от ТЭЦ с комбинированным производством электрической и тепловой энергии. При этом способе изменение отпуска тепла в соответствии с нагрузкой производится централизованно на источнике (ТЭЦ или котельной) путем изменения температуры сетевой воды в подающей линии в зависимости от температуры наружного воздуха. Расход воды при этом в основном остается постоянным и равным расчетной величине  $V_{op}$ . Этот расход определяется при расчетной для отопления температуре наружного воздуха и равен:

$$V_{op} = Q_{op} * 1000 / (T_{1p} - T_{2p}), \text{ т/ч} \quad (16)$$

где:  $Q_{op}$  – расчетная нагрузка отопления, Гкал/ч;

$T_{1p}$  – расчетная температура в подающей линии, оС;



$T_{2p}$  – расчетная температура в обратной линии, оС.

Зависимость температур сетевой воды в подающем и обратном трубопроводе от температуры наружного воздуха называется температурным графиком тепловой сети. Как уже отмечалось, при центральном качественном регулировании этот график определяется исходя из условия постоянства расхода воды на отопление и называется отопительным температурным графиком.

В современных системах теплоснабжения применяются различные температурные графики, отличающиеся значениями температур сетевой воды в подающей и обратной линиях при расчетной температуре наружного воздуха. Так используются температурные графики  $T_{1p}/T_{2p} = 150/70, 130/70, 120/70$  и  $95/70$  оС. То технико-экономическим соображениям в настоящее время наибольшее распространение получил температурный график  $150/70$  оС. Пример такого графика приведен на рис.8, на котором по горизонтальной оси отложены значения относительной удельной нагрузки отопления  $q_0$ , связанные с температурой наружного воздуха соотношением:

$$q_0 = (t_{vp} - t_n) / (t_{vp} - t_{np}) \quad (17)$$

где:  $t_{np}$  – температура наружного воздуха, расчетная для отопления, оС;

$t_{vp}$  – расчетная температура воздуха в помещениях, оС;

$t_n$  – текущая температура наружного воздуха, оС.

Пересчет относительной удельной нагрузки на температуру наружного воздуха может быть произведен по формуле:

$$t_n = t_{vp} - q_0 * (t_{vp} - t_{np}).$$

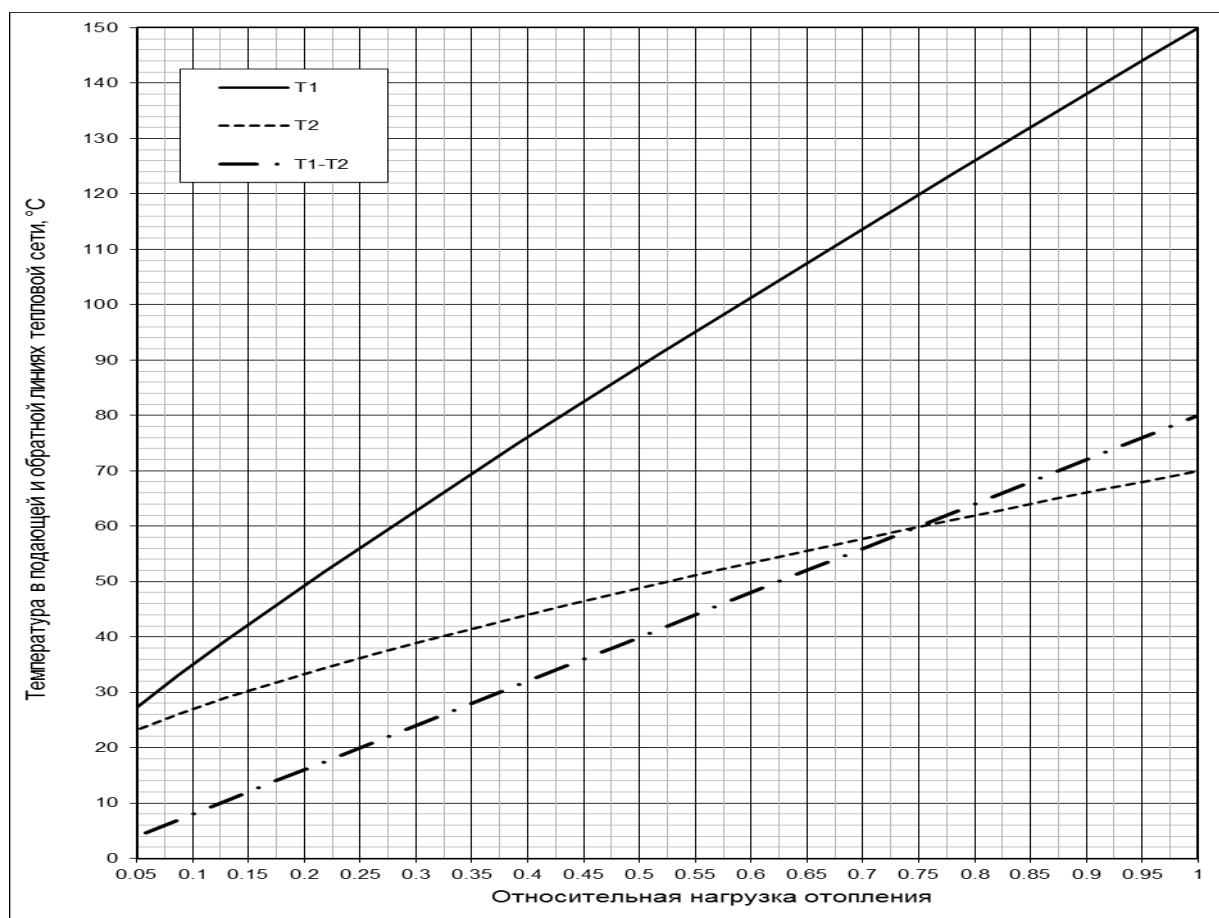


Рис. 8 Температурный график качественного регулирования

На рис. 8 приведен также график зависимости от  $q_0$  (от температуры наружного воздуха) разности температур в подающем и обратном трубопроводах.

В последнее время широко обсуждается вопрос перехода на регулирование отпуска тепла при переменных расходах воды, связанных с отличием температурного графика на источнике тепла и в тепловой сети от отопительного графика. Этот подход принято называть методом качественно-количественного регулирования. При этом методе температуры в подающей линии превышают их значения в соответствии с отопительным графиком, а расход воды в тепловой сети меняется в зависимости от этого превышения. Следует отметить, что в современных системах теплоснабжения с автоматизированными потребителями изменение расхода воды в тепловых сетях не может быть реализовано напрямую, изменением напора насосов на источнике тепла, поскольку расходы воды определяются работой регуляторов у потребителя. Так если системы отопления оснащены только регуляторами постоянства расхода, то изменение расхода воды в сети не может быть получено центральным регулированием на источнике. В соответствии с этим практическая реализация метода качественно-количественного регулирования может быть осуществлена только при оснащении систем отопления регуляторами нагрузки, меняющими расход воды на отопление в зависимости от температур наружного воздуха и сетевой воды в подающей линии, обеспечивая подачу на отопление требуемого количества тепла. Только при этом условии изменение (повышение) температуры в подающей приведет к изменению (снижению) расхода воды на отопление и в тепловой сети.

Основную проблему при этом составляют наиболее распространенные схемы отопления с зависимым элеваторным присоединением, которые для получения требуемого эффекта должны существенно усложняться и дополняться соответствующей регулирующей аппаратурой.

Следует отметить, что подогреватели горячего водоснабжения в основном оснащены регуляторами температуры водопроводной воды, что соответствует условиям регулирования нагрузки в зависимости от подающей температуры и позволяет реализовать переход на повышенную температуру в подающей линии. Аналогичное положение имеет место и при присоединении к тепловым сетям вентиляционных систем, в которых установлены регуляторы температуры подаваемого в помещения воздуха.

Переход на графики качественно-количественного регулирования легко осуществим также при присоединении отопительной нагрузки по независимой схеме, при которой перед теплообменником отопления установлены регуляторы температуры воды в контуре отопления, поддерживающие эту температуру в зависимости от температуры наружного воздуха.

Выше рассмотрен ряд технических условий, необходимых для осуществления перехода с чисто качественного на качественно-количественное регулирование. Однако этот переход требует соответствующего технико-экономического обоснования, поскольку меняет режимы работы и показатели практически всего оборудования систем теплоснабжения, что имеет как положительные, так и отрицательные особенности по сравнению с качественным регулированием.

В качестве основного положительного эффекта при изменении способа регулирования отпуска тепла следует рассматривать возможность снижения затрат электроэнергии на перекачку сетевой воды. Однако при увеличении подающей температуры возрастают тепловые потери через изоляцию трубопроводов тепловых сетей и самое главное, при отпуске тепла от ТЭЦ снижается доля комбинированной выработки электроэнергии за счет необходимости увеличения давления в теплофикационных отборах. Последнее приводит к снижению эффективности выработки электрической энергии.

Таким образом снижение затрат на перекачку теплоносителя является одним из определяющих критериев оценки эффективности применения качественно-количественного регулирования поскольку величина этого показателя может иметь решающее значение.

Величина снижения затрат электроэнергии в свою очередь определяются используемым на источнике тепла способом регулирования насосов.

В целях сопоставления затрат электроэнергии рассмотрим наиболее простую ситуацию, позволяющую тем не менее получить основные расчетные соотношения и на их основе провести качественную оценку затрат для различных методов регулирования отпуска тепла. Будем рассматривать показатели перехода для тепловой сети, к которой присоединены потребители только с отопительной тепловой нагрузкой. При этих условиях расход воды в системе будет оставаться постоянным и равным расчетному значению, определяемому по формуле (16). Будем также считать, что характеристика установленных насосов подобрана в соответствии с гидравлическим сопротивлением тепловой сети и присоединенными потребителями, а заданный располагаемый напор сети  $\Delta H_c$  при расчетном расходе воды  $V_{op}$  равен развиваемому напору насосов  $\Delta H_n$ .

Для такой систем годовые затраты на перекачку сетевой воды будут определяться продолжительностью отопительного периода  $z_{от}$  и могут быть рассчитаны по формуле:

$$Э_{ка} = K * (\Delta H_c * V_{op} / \eta_{на}) * z_{от}, \text{ кВт*ч} \quad (18)$$

При переходе на качественно-количественное регулирование через насосы будет проходить переменный в течение отопительного периода расход воды, который определяется повышением температуры в подающей линии по сравнению с отопительным температурным графиком.

Для определения расходов воды будем использовать линейное представление зависимости температур сетевой воды в зависимости от температуры наружного воздуха. Так для отопительного графика качественного регулирования могут быть предложены следующие линейные зависимости.

Температура в подающей линии:

$$T_{1к} = t_{вр} + (T_{1р} - t_{вр}) * (t_{вр} - t_n) / (t_{вр} - t_{нр}). \quad (19)$$

Температура в обратной линии:

$$T_{2к} = t_{вр} + (T_{2р} - t_{вр}) * (t_{вр} - t_n) / (t_{вр} - t_{нр}). \quad (20)$$

При расчетных условиях по температуре наружного воздуха, т.е. при  $t_n = t_{нр}$  температуры сетевой воды будут составлять:

$$T_{1к} = T_{1р} \text{ и } T_{2к} = T_{2р}.$$

При температуре наружного воздуха, равной расчетной температуре воздуха в помещениях ( $t_n = t_{np}$ ) температуры сетевой воды будут одинаковы и равны:

$$T_{1к} = T_{2к} = t_{вр}$$

Разность температур  $T_{1к}-T_{2к}$  определяющая расход воды при заданной величине тепловой нагрузки с учетом (19) и (20) также будет линейной в зависимости от  $t_n$  и определяться формулой:

$$\begin{aligned} \Delta T_{к} &= (T_{1р} - T_{2р}) * (t_{в} - t_{нр}) / (t_{вр} - t_{нр}) = \\ &= \Delta T_{р} * (t_{вр} - t_n) / (t_{вр} - t_{нр}). \end{aligned}$$

Эта зависимость полностью соответствует приведенному на рис. 8 графику и позволяет достаточно точно определять соответствующие значения расходов воды в тепловой сети.

При переходе на повышенные температурные графики качественно-количественного регулирования будем считать, что нагрузка отопления присоединяется по зависимой элеваторной схеме с соответствующим оснащением регулирующей аппаратуры. В этих условиях температуры воды в обратной линии в зависимости от  $t_n$  остаются неизменными и будут равны их величине при качественном регулировании.

Для оценки расходов воды при качественно-количественном регулировании представим график изменения температуры в подающей линии следующей линейной зависимостью от  $t_n$ :

$$T_{1кк} = T_{1н} + (T_{1р} - T_{1н}) * (t_{вр} - t_n) / (t_{вр} - t_{нр}). \quad (21)$$

где:  $T_{1н}$  – подающая температура при  $t_n = t_{вр}$ .

Величина  $T_{1н}$  будет принимать значения, большие  $t_{вр}$ , что обеспечит превышение  $T_{1кк}$  над  $T_{1к}$  при всех температурах наружного воздуха кроме  $t_n = t_{нр}$ . При этом, чем больше  $T_{1н}$ , тем более высоким будет температурный график по подающей линии.

При этих условиях разность температур в подающей и обратной линиях при качественно-количественном регулировании будет

$$\begin{aligned} \Delta T_{кк} &= (T_{1н} - t_{вр}) * (t_n - t_{нр}) / (t_{вр} - t_{нр}) + \Delta T_{р} * (t_{вр} - t_n) / (t_{вр} - t_{нр}) = \\ &= \Delta T_{н} * (t_n - t_{нр}) / (t_{вр} - t_{нр}) + \Delta T_{р} * (t_{вр} - t_n) / (t_{вр} - t_{нр}) \end{aligned} \quad (22)$$

$$= \Delta T_{р} * (t_{вр} - t_n) / (t_{вр} - t_{нр}) * X(t_n). \quad (23)$$

Зависящий от температуры наружного воздуха множитель  $X$  следует определять по формуле:

$$X = 1 + \Delta T_{н} / \Delta T_{р} * (t_n - t_{нр}) / (t_{вр} - t_n) \quad (24)$$

Величина этого коэффициента нелинейно зависит от температуры наружного воздуха.

При  $t_n = t_{нр}$   $X = 1$  и разность температур  $\Delta T_{кк} = \Delta T_{р}$ .

При  $t_n = t_{вр}$   $X \rightarrow \infty$ , однако с учетом (22) величина  $\Delta T_{кк} = \Delta T_{н}$ .

Предлагаемый график качественно-количественного регулирования зависит от величины  $\Delta T_{н}$ , равной превышению температуры в подающей линии над температурой качественного регулирования при температуре наружного воздуха  $t_n = t_{вр}$ . При качественном регулировании  $\Delta T_{н} = 0$ . Максимальное значение этой величины будет иметь место при чисто количественно регулировании и определяется равенством  $\Delta T_{н} = T_{1р} - t_{вр}$ .

Изменение тепловой нагрузки отопления в зависимости от температуры наружного воздуха определяется формулой:

$$Q_0 = q_0 * Q_{op} = Q_{op} * (t_{вp} - t_{н}) / (t_{вp} - t_{нp}). \quad (25)$$

При этом расход воды на отопление определяется зависимостью:

$$V_0 = Q_0 / \Delta T_{кк} = V_{op} / X(t_{н}) \quad (26)$$

В соответствии с последней формулой величина перекачиваемого расхода определяется показателем  $X$  и, следовательно, температурой наружного воздуха.

При  $t_{н} = t_{нp}$   $X = 1$  и  $V_0 = V_{op}$ .

При  $t_{н} = t_{вp}$  расход воды стремится к 0 при любых  $\Delta T_{н}$  и  $\Delta T_{p}$ .

Кроме расхода воды, затраты электроэнергии на перекачку зависят от продолжительности какого-либо режима. Для определенности будем считать, что известно распределение температур наружного воздуха по продолжительности стояния в течение отопительного периода или среднемесячные температуры наружного воздуха при известной продолжительности каждого месяца в отопительном периоде. Другими словами известны значения продолжительности интервалов времени  $z_i$ , составляющие в сумме продолжительность отопительного периода  $z_{от}$  и соответствующие этим интервалам температуры наружного воздуха  $t_{нi}$  средние для указанных интервалов.

Величина снижения затрат электроэнергии в свою очередь определяются используемым на источнике тепла способом регулирования насосов, обеспечивающем поддержание заданного располагаемого напора в тепловой сети при переменных расходах воды.

Затраты электроэнергии на перекачку при переменном расходе воды качественно-количественного регулирования  $\Delta E_{кк}$  в течение отопительного периода при принятых выше условиях в общем виде могут быть представлены в виде:

$$\Delta E_{кк} = K * \sum [ z_{oi} * (\Delta H_{нi} * V_{нi}) / \eta_{наi} ] \quad (27)$$

При частотном регулировании насосов затраты электроэнергии представимы в виде:

$$\Delta E_{кч} = K * \sum [ z_{oi} * (\Delta H_{с} * V_{oi}) / \eta_{на} ]. \quad (28)$$

Если распределить затраты электроэнергии при качественном регулировании на те же интервалы времени  $z_{oi}$  и считать, что КПД насосных агрегатов неизменны, то разность затрат электроэнергии при качественном и качественно-количественном регулировании и частотном регулировании насосов будет составлять:

$$\begin{aligned} \Delta E_{кч} &= E_{ка} - E_{кч} = \\ &= K * \sum [ z_{oi} * (\Delta H_{з} * V_{op}) ] / \eta_{на} - K * \sum [ z_{oi} * (\Delta H_{з} * V_{oi}) ] / \eta_{на} = \\ &= K * \sum [ z_{oi} * (\Delta H_{з} * (V_{op} - V_{oi})) ] / \eta_{на} \end{aligned}$$

С учетом (26) последняя формула может быть представлена в виде:

$$\Delta E_{кч} = \sum [ z_{oi} * (\Delta H_{з} * V_{op} * (1 - 1/X_i)) ] / \eta_{на}. \quad (29)$$

В последней формуле множитель  $(1 - 1/X_i)$  зависит от температуры наружного воздуха и всегда меньше единицы, за исключением расчетной температуры, при которой этот множитель равен 0 ( $X_i = 1$  при  $t_{н} = t_{нp}$ ). При всех других температурах наружного воздуха  $(1 - 1/X_i)$  больше нуля и следовательно  $\Delta E_{кч}$  всегда положительная величина.

Экономия электроэнергии зависит от показателя  $X$ , определяющего повышение графика количественно-качественного регулирования и соответствующее снижение расхода воды в тепловой сети. Так при качественном регулировании  $X = 1$  и  $\Delta \text{Экч} = 0$ . Максимальная же величина экономии электроэнергии на перекачку будет соответствовать графику качественного регулирования, характеризующегося наибольшими значениями  $X_i$ .

При регулировании дросселированием затраты электроэнергии представимы в виде:

$$\text{Эккд} = K * \sum [ z_{oi} * ((\Delta H_c + \Delta H_{др_i}) * V_{oi}) / \eta_{nai} ] \quad (30)$$

С учетом указанных выше условий разность затрат электроэнергии при качественном и качественно-количественном регулировании при регулировании насосов дросселированием будет составлять:

$$\begin{aligned} \Delta \text{Экд} &= \text{Эка} - \text{Эккд} = \\ &= K * \sum [ z_{oi} * (\Delta H_z * V_{op}) ] / \eta_{на} - K * \sum [ z_{oi} * ((\Delta H_z + \Delta H_{др_i}) * V_{oi}) ] / \eta_{на} = \\ &= \sum [ z_{oi} * (\Delta H_z * V_{op} * (1 - 1/X_i)) ] / \eta_{на} - \sum [ z_{oi} * (\Delta H_{др_i} * V_{op} * (1 - 1/X_i)) ] / \eta_{на}. \end{aligned} \quad (31)$$

где:  $\Delta H_{др_i}$  – величина дросселирования развиваемого насосом напора при регулировании.

Поскольку в последней формуле первое слагаемое существенно больше второго слагаемого, экономия затрат электроэнергии на перекачку при рассматриваемом способе регулирования  $\Delta \text{Экд}$  всегда больше нуля.

Сопоставление (29) и (31) показывает, что экономия затрат электроэнергии при частотном регулировании превосходит экономию при регулировании дросселированием. Их разница определяется величиной затрат, связанных с дросселированием напора на регуляторе, которая всегда положительна и равна:

$$\Delta \text{Экч} - \Delta \text{Экд} = \sum [ z_{oi} * (\Delta H_{др_i} * V_{op} * (1 - 1/X_i)) ] / \eta_{на}$$

При регулировании рециркуляцией предусматривается работа насосов в одной точке их характеристики и затраты электроэнергии на перекачку сетевой воды будут равны:

$$\text{Экр} = K * \sum [ z_{oi} * (\Delta H_c * V_{op}) / \eta_{nai} ]. \quad ()$$

Эта величина при принятых условиях полностью соответствует затратам электроэнергии при качественном регулировании, т.е.  $\text{Эка} = \text{Экр}$  и экономия затрат электроэнергии при регулировании рециркуляцией отсутствует.

Как следует из приведенного материала, экономия затрат на перекачку сетевой воды при переходе от метода качественного регулирования отпуска тепла на качественно-количественное регулирование определяется способом регулирования насосов и будет максимальной при использовании частотного регулирования с оснащением насосов аппаратурой ЧРП. При регулировании рециркуляцией экономия электроэнергии отсутствует, а при регулировании дросселированием величина экономии будет иметь промежуточное значение.

Расчетные зависимости приведены для определенных условий, связанных в первую очередь с схемами и оборудованием потребителей тепловой энергией, что позволило получить достаточно простые зависимости. При присоединении к тепловым сетям систем отопления потребителей с независимой схемой и, главное, с наличием нагрузки горячего водоснабжения, существенно усложняется зависимость расхода воды в тепловой сети от температуры наружного воздуха, а также изменение этой зависимости при различных методах регулирования

отпуска тепла. Это не позволяет получить аналитические соотношения простого вида и требует проведения достаточно сложных расчетов по определению экономии затрат на перекачку по всем выделяемым интервалам времени в течение отопительного периода и года. Однако полученные при этом результаты в основном будут соответствовать полученным выше выводам.

Приведенные формулы соответствуют использованию на источнике тепла для перекачки сетевой воды одного насоса. Справедливы приведенные выше соотношения также при параллельном включении нескольких однотипных насосов, однако при этом КПД насосных установок следует принимать относительно расхода воды через каждый агрегат и должны определяться в зависимости от суммарного расхода воды через насосную группу и количества включенных насосов.

### **Выводы**

1. Обеспечение требуемых гидравлических режимов в циркуляционных системах за счет регулирования насосов приводит к дополнительным потерям энергии на регулирование, за исключением способа частотного регулирования, которое позволяет кроме того обеспечить режимы работы насосов с наибольшими КПД. Таким образом, ЧРП является наиболее энергетически эффективным способом регулирования насосов при переменных расходах воды в присоединенных системах.

2. При постоянных расходах воды экономически целесообразным является более точное согласование гидравлических характеристик насосов и присоединенных сетей, производимых подбором насосов, обточкой их рабочих колес и/или проведением наладочных мероприятий в сетях.

3. Для получения наибольшего положительного энергетического и экономического эффекта по затратам на перекачку воды при переходе на метод качественно-количественного регулирования отпуска тепла в тепловых сетях потребители должны быть оснащены соответствующей регулирующей аппаратурой, позволяющей реализовать этот переход, а для регулирования насосов на источниках тепла следует использовать частотное регулирование насосов.

### **Список используемых источников.**

1. Байбаков С. А., Шакирова Е. А. Регулирование насосно-перекачивающих станций тепловых сетей и составление режимных карт// Энергетик. 2009. №8.

*Данная работа выполнена сотрудниками ОАО «ВТИ» Байбаковым С. А. и к.т.н. Субботиной Е. А. по гранту, предоставленному Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (соглашение №14.U02.21.0351 от 27 июля 2012г).*