

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В. И. ВЕРНАДСКОГО»**

**АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ**

**ФАКУЛЬТЕТ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭНЕРГЕТИКИ**

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ СИСТЕМ  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ**

**Методические указания**

по выполнению практических занятий

направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства,  
направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны  
водных ресурсов»

Симферополь

2019

Энергосбережение в инженерных системах водоснабжения и водоотведения: Методические указания к практическим занятиям для обучающихся направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов». – Симферополь, 2019. – 42 с.

Методические указания предназначены для обучающихся по направлению подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов». Указания содержат примеры расчета, индивидуальные задания, а также рекомендации по выполнению практических работ по энергосбережению в инженерных системах водоснабжения и водоотведения

Составители: Николенко И.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и санитарной техники.

Котовская Е.Е., старший преподаватель кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники.

Утверждено на заседании учебно-методической комиссии факультета водных ресурсов и энергетики от 24 апреля 2019 года, протокол № 8.

Одобрено на заседании кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники от 17 апреля 2019 года, протокол № 17.

© Николенко И.В., Котовская Е.Е., 2019

©ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского», АСиА, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 4  |
| ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ НАСОСА И ТРУБОПРОВОДА И ПРИ ИХ КОЛИЧЕСТВЕННОМ СПОСОБЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ..... | 5  |
| ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОПАСТНЫХ НАСОСОВ ОБТОЧКОЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА.....  | 16 |
| ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА (ИНТЕГРАЛЬНЫЙ СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ).....                                      | 28 |
| ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГУЛИРОВАНИИ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ПО МАКСИМАЛЬНОМУ НАПОРУ В СЕТИ.....                                | 40 |
| ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ ЛИНЕЙНО-ИНТЕГРАЛЬНОМ СПОСОБЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА.....                              | 52 |
| ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА.....                       | 65 |
| ЛИТЕРАТУРА .....   | 80 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ .....   | 81 |

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности использования энергии, ресурсов в технических и технологических системах повышает надежность энергоснабжения, уменьшает спрос на природные ресурсы, а также повышает их экологическую. Поэтому одним из условий устойчивого развития и рациональной экономической деятельности в системах водоснабжения и водоотведения (СВВ) является повышение эффективности использования ресурсов и энергии.

Энергосбережение в инженерных системах водоснабжения и водоотведения совместно с другими специальными дисциплинами общенаучного цикла формирует у обучающихся знания по роли, и структуре ее разделов, а также их взаимосвязи при освоении основной профессиональной образовательной программы по специальности; умение разбираться в основных приемах осуществления энергетического анализа технологических процессов и устройств, применяемых в СВВ, порядке внедрения новых механизмов энерго- и ресурсосбережения, умение рационально использовать их по профилю подготовки в строительстве, повысить производительность труда и снизить себестоимость продукции, обеспечить навыки правильной эксплуатации машин и ее технического обслуживания, а также безопасной эксплуатации машин.

Дисциплина является основой комплекса технических дисциплин, знание которых необходимо магистрантам направления подготовки - строительство по профилю водоснабжение и водоотведение, а именно по дисциплинам водоснабжение и водоподготовка промышленных предприятий, водоотведение и очистка сточных вод промышленных предприятий, спецкурсы по водоснабжению и водоотведению

Знания, умения и навыки, формируемые дисциплиной «Энергосбережение в инженерных системах водоснабжения и водоотведения», необходимы для их последующего применения при разработке по разработке комплексных программ энергосбережения и высокоэффективных технологических процессов строительства, монтажа и реконструкции СВВ, а также их инженерных сетей, зданий, сооружений.



## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ НАСОСА И ТРУБОПРОВОДА И ПРИ КОЛИЧЕСТВЕННОМ СПОСОБЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИХ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ

**Цель работы:** Практическое изучение методов оценки энергетической эффективности совместной работы центробежного насоса и трубопровода. Количественное и качественное регулирование. Способы количественного регулирования. Построить график совместной работы насоса и трубопровода при количественном регулировании напорной задвижкой. Определение фактических потерь напора в напорном трубопроводе и степени прикрытия задвижки. Определение потребляемой мощности, КПД и кавитационного запаса насосной установки. Выполнение работы по определению параметров регулирования совместной работы центробежный насос трубопровод степенью открытия напорной задвижки по индивидуальному заданию. Определить удельные показатели энергетической эффективности при совместной работе насосного агрегата и трубопровода и при их количественном регулировании.

#### 1. Методы регулирования параметров совместной работы насоса и трубопровода

Напорной характеристике центробежного насоса и трубопровода при их совместной работе соответствует *рабочая точка*, которая задается в соответствии с обеспечением спроса потребителей подачей  $Q$ , при определенном напоре  $H$ . Количество типоразмеров центробежных насосов ограничено, каждый из которых имеет рабочий диапазон напорных характеристик. Для изменения параметров рабочей точки совместной работы насоса и трубопровода необходимо изменять напорную характеристику насоса, насосной установки либо характеристику трубопровода.

Процесс искусственного изменения напорной характеристики насоса или характеристики трубопровода для обеспечения требуемой подачи называется *регулированием*. Основной задачей регулирования насоса является обеспечение его работы в требуемой рабочей точке при максимальном КПД и минимальных потерях.

Центробежные насосы отличаются от других типов насосов свойством *саморегулирования* и возможностью *принудительного* регулирования в широких пределах их подач и напоров. Под свойством саморегулирования центробежного насоса понимается изменение режима его работы, которое вызывается при изменении сопротивления трубопровода или потерь напора в нем. Принудительным регулированием режимов совместной работы насоса и трубопровода называется изменение характеристик насоса или трубопровода за счет изменения их геометрических или кинематических параметров.

Видами принудительного регулирования параметров совместной работы центробежного насоса и трубопровода являются:

- **количественный** метод за счет изменение характеристики сети;
- **качественный** метод за счет изменение напорной характеристики насоса.

## 2. Способы количественного регулирования за счет изменения характеристик трубопровода

Характеристика сети может изменяться следующими способами:

- изменением степени открытия напорной задвижки (после насоса);
- изменением степени открытия всасывающей задвижки (до насоса);
- изменением открытия параллельной задвижки (байпасирование).

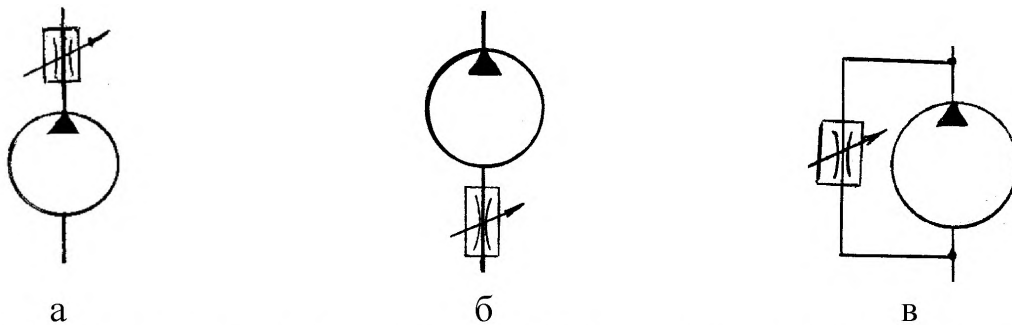


Рис.1. Регулирование изменением характеристик сети: а – напорной задвижкой (дроссель на выходе), б – всасывающей задвижкой (дроссель на входе), в – параллельная задвижка (перепуск байпасным дросселем).

**Изменением степени открытия напорной задвижки (после насоса).** Способ является наиболее простым и наиболее распространенным. Энергетически способ несовершенный, так как связан со значительным понижением КПД насосной установки.

**Изменением степени открытия всасывающей задвижки (до насоса).** По сравнению с предыдущим оказывается несколько энергетически выгоднее, но применение такого регулирования возможно только в насосах, работающих с подпором на всасывании, так как, вводя дополнительные сопротивления на всасывающей линии, увеличивается разрежение на входе, и следовательно, увеличивается опасность кавитации. Этим способом пользуются в тех случаях, когда необходимо поддерживать постоянным давление на выходе из насоса.

**Изменением степени открытия параллельной задвижки.** При этом способе происходит перепуск жидкости из трубопровода нагнетания в трубопровод всасывания. Применяется главным образом, как мерой, предупреждающей срыв работы насоса при небольших подачах жидкости, а также для сохранения небольшой циркуляции воды в насосе при закрытой напорной задвижке, вследствие чего устраняется нагревание насосной установки.

Насос с напорной характеристикой  $H = f(Q)$  должен обеспечить подачу  $Q_H$  с напором  $H_H$ . При гидростатическом напоре  $H_T$  характеристика сети  $H_c = H_T + S_c \cdot Q^2$ . Точка пересечений характеристик (рис.1а) соответствует

рабочей точке А при совместной работе насоса и трубопровода с открытой напорной задвижкой. Рабочей точке А соответствует подача  $Q$ . Чтобы напорная характеристика насоса пересекалась с характеристикой сети при подаче  $Q_H$ , необходимо увеличить в сети потери напора до величины  $H_B$ . Это осуществляется прикрытием напорной задвижки. В результате увеличения потерь напора изменяется напорно-расходная характеристика трубопровода, которая пойдет круче и пересечет напорную характеристику насоса в точке В. При этом режиме напор насоса  $H_B$  складывается из требуемого напора  $H_H$  и потерь напора  $h_3$  в задвижке. Потери мощности в насосе при таком способе составляют  $\Delta N = Q_H \cdot \rho \cdot g \cdot h_3 / \eta_H$ . Рабочее поле при регулировании напорной задвижкой определяется из условия работы насоса при минимально допустимом КПД  $\eta_{\min} = (0,85 \dots 0,9) \cdot \eta_{\max}$ . Очевидно, что при минимальном значении КПД допустимое при эксплуатации насосного агрегата рабочее поле определяется участком  $ab$  на его напорной характеристике (рис. 1б).

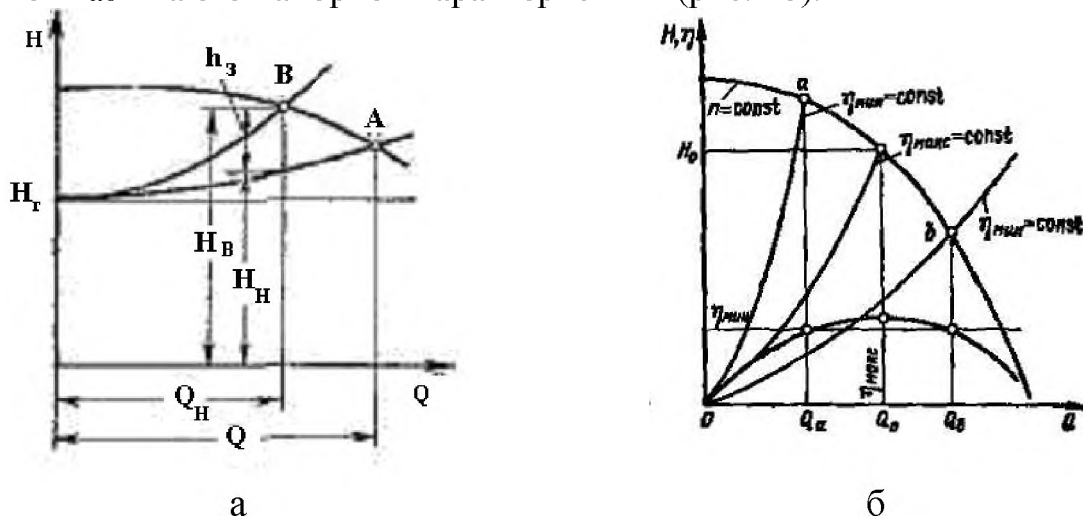


Рис.1. Количественное регулирование параметров совместной работы центробежного насоса и трубопровода напорной задвижкой: а – определение рабочей точки, б – рабочее поле при регулировании напорной задвижкой

### 3. Порядок выполнения работы

Для заданного типоразмера насоса, его напорной характеристике и напорно-расходной характеристике трубопровода определяется режим их совместной работы при открытой задвижке. Определяются по напорной характеристике насоса и характеристике трубопровода параметры рабочей точки при открытой задвижке по подаче, напору, мощности, КПД и кавитационному запасу. Для заданного расчетного расхода в трубопроводе определяются параметры его напорно-расходной характеристики для определения положения рабочей точки при прикрытой задвижке. По напорной характеристике насоса и характеристике трубопровода определяются параметры рабочей точки при прикрытой задвижке по подаче, напору, мощности, КПД и кавитационному запасу. По величине потерь напора  $h_3$  в задвижке определяется ее степень прикрытия. По положению

рабочей точки на напорной характеристике насоса находят ее положение относительно рабочего поля при дросселировании.

#### 4. Пример выполнения задания работы.

**4.1. Задание.** Центробежный насос Д2000-21 с диаметром рабочего колеса  $D_k=460$  мм, с частотой вращения рабочего колеса  $n = 980$  об/мин по трубопроводу с геометрической высотой подъема воды трубопроводом  $H_r = 16$  м и приведенным коэффициентом сопротивления трубопровода  $S = 5,32 \cdot 10^{-6} \frac{м}{(м^3/ч)^2}$ . должен обеспечить заданную расчетную подачу  $Q_p = 1300$  м<sup>3</sup>/час. Определить параметры работы насоса с трубопроводом при открытой задвижке и закрытой задвижке при обеспечении расчётной подачи.

#### 4.2. Построение характеристик насоса и сети

По заданному типоразмеру по каталогу насосов находим графическое изображение характеристик насоса Д2000-21 с диаметром рабочего колеса  $D_k=460$  мм, с частотой вращения рабочего колеса  $n = 980$  об/мин. Характеристики насоса представляют собой при постоянной частоте вращения  $n$  зависимости напора  $H=f(Q)$ , мощности  $N=f(Q)$  и КПД  $\eta = f(Q)$ , допустимого кавитационного запаса  $\Delta h = f(Q)$  от подачи (рис.2). В каталоге насосов марки Д по напорной характеристике насоса Д2000-21 определим рабочий интервал по подаче  $1000 \leq Q \leq 2400$  м<sup>3</sup>/час.

Напорно-расходная характеристика трубопровода записывается в виде

$$H_m = H_r + S \cdot Q^2 = 16 + 5,32 \cdot Q^2 \cdot 10^{-6}, м$$

Подставим в характеристику трубопровода 8...10 значения подач в диапазоне значений подач характеристик насоса. Результаты расчета характеристики трубопровода приведем в табличной форме (таблица 1)

Результаты расчета характеристики трубопровода

Таблица 1.

| Q,<br>м <sup>3</sup> /час | 0  | 250  | 500  | 750  | 1000 | 1250 | 1500 | 1750 | 2000 | 2250 |
|---------------------------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $H_m$ ,<br>м              | 16 | 16,3 | 17,3 | 19,0 | 21,3 | 24,3 | 28,0 | 32,3 | 37,3 | 42,9 |

Нанесем полученную характеристику трубопровода на напорную характеристику насоса, как показано на рис.2. Точка пересечения напорной характеристики насоса и характеристики трубопровода (точка В) является рабочей точкой устойчивой работы насосной установки при открытой задвижке.

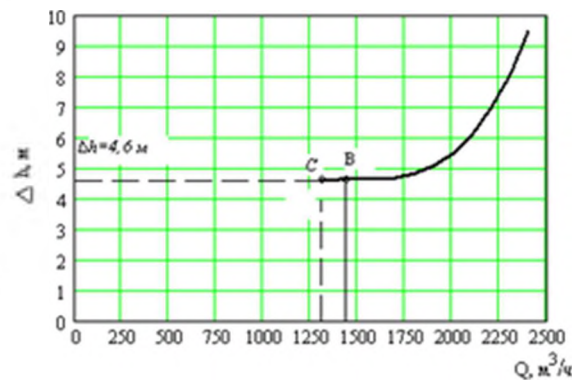
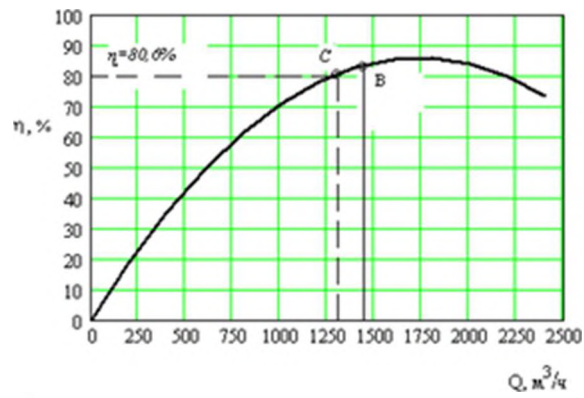
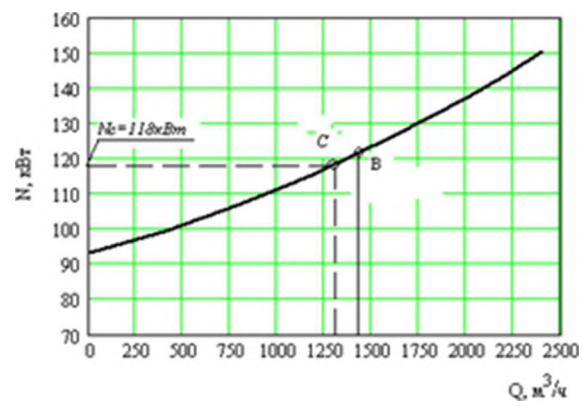
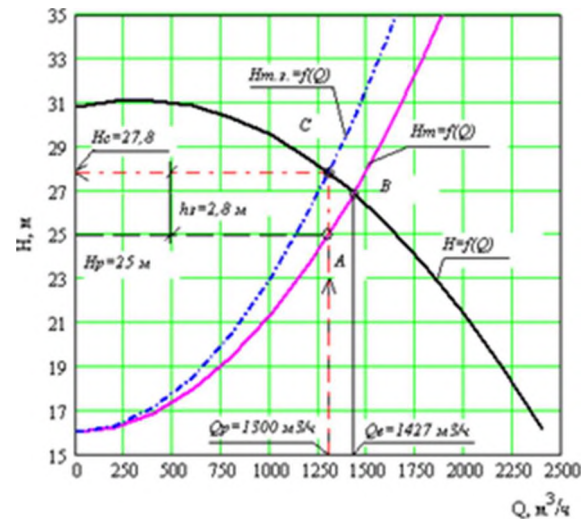


Рис. 2. Характеристика совместной работы насоса Д2000-21 с трубопроводом

Подача  $Q_B = 1427 \text{ м}^3/\text{ч}$  превышает заданную расчетную подачу  $Q_p = 1300 \text{ м}^3/\text{ч}$  необходимую потребителю. Для обеспечения расчетной подачи  $Q_p$  необходимо чтобы характеристика сети проходила через точку  $C$ . Это может быть достигнуто количественным регулированием работы системы насос-трубопровод, т.е. прикрытием задвижки.

Необходимое сопротивление задвижки определяется разностью напоров: точки  $A$  - работы сети при открытой задвижке и  $C$  - работы сети при прикрытой задвижке:

$$h_3 = H_C - H_A, \quad (1)$$

Из графика на рис. 2 определим необходимое сопротивление задвижки  $h_3 = 27,8 - 25 = 2,8 \text{ м}$ .

Коэффициент сопротивления задвижки определим по выражению:

$$\xi_3 = \frac{2gh_3}{v_3^2}, \quad (2)$$

где  $v_3$  - скорость воды в напорном трубопроводе перед задвижкой, м/с.

Диаметр трубопровода перед задвижкой равен диаметру напорного патрубка насоса:

$$v_3 = \frac{4Q_p}{\pi d_n^2}, \quad (3)$$

Из каталога насосов марки  $D$  для насоса  $D2000-21$  диаметр напорного патрубка составляет  $d_n = 0,4 \text{ м}$ . По расчетным формулам (2) и (3) получим:

- скорость воды в напорном трубопроводе перед задвижкой

$$v_3 = \frac{4 \cdot 1300}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,4^2} = 2,88 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

- коэффициент сопротивления задвижки

$$\xi_3 = \frac{2 \cdot 9,8 \cdot 2,8}{2,88^2} = 6,61.$$

По коэффициенту сопротивления задвижки  $\xi_3$  по ее типу и характеристике определяется степень прикрытия задвижки.

Характеристика трубопровода при прикрытой задвижке ( $H_{m.з.}$ ) пройдет через точку  $C$  и записывается в виде:

$$H_{m.з.} = H_\Gamma + S_3 \cdot Q^2, \quad (4)$$

где коэффициент  $S_3$  - приведенный коэффициент сопротивления при прикрытой задвижке определим приведенный коэффициент сопротивления трубопровода с прикрытой задвижкой по выражению:

$$S_3 = \frac{H_C - H_\Gamma}{Q_p^2}, \quad (5)$$

По условию задачи определим приведенный коэффициент сопротивления трубопровода с закрытой задвижкой

$$S_3 = \frac{27,8 - 16}{1300^2} = 6,98 \cdot 10^{-6} \frac{м}{м^6 / ч^2}.$$

В результате напорно-расходная характеристика трубопровода с закрытой задвижкой записывается в виде

$$H_{mз} = H_{\Gamma} + S_3 \cdot Q^2 = 16 + 6,98 \cdot Q^2 \cdot 10^{-6}, м$$

Подставим в характеристику трубопровода с закрытой задвижкой 8... 10 значения подач в диапазоне значений подач характеристик насоса. Результаты расчета характеристики трубопровода приведем в табличной форме (таблица 2).

Результаты расчета характеристики трубопровода с закрытой задвижкой

Таблица 2.

|                           |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q,<br>м <sup>3</sup> /час | 0  | 250  | 500  | 750  | 1000 | 1250 | 1500 | 1750 | 2000 | 2250 |
| H <sub>mз</sub> ,<br>м    | 16 | 16,4 | 17,7 | 19,9 | 23,0 | 26,9 | 31,7 | 37,4 | 43,9 | 51,3 |

Нанесем полученную характеристику трубопровода с закрытой задвижкой на напорную характеристику насоса, как показано на рис. 2. Точка пересечения напорной характеристики насоса и характеристики трубопровода (точка С) является рабочей точкой устойчивой работы насосной установки при закрытой задвижке.

#### 4.3. Определение параметров совместной работы насоса с трубопроводом при открытой и закрытой задвижке

По характеристикам насоса (рис. 2) по подаче *при открытой задвижке*  $Q_B = 1427 \text{ м}^3/\text{час}$  определим по характеристикам параметры насоса при открытой задвижке: мощность  $N_B = 120 \text{ кВт}$ , КПД  $\eta_B = 82\%$  и допустимый кавитационный запас  $\Delta h_B = 4,6 \text{ м}$ .

По расчетной подаче  $Q_p = 1300 \text{ м}^3/\text{час}$  *при закрытой задвижке* по характеристикам насоса определим его параметры: напор  $H_c = 27,8 \text{ м}$ , при этом часть этого напора теряется на задвижке, за задвижкой напор равен расчетному  $H_p = 25 \text{ м}$ , мощность  $N_c = 118 \text{ кВт}$ , КПД  $\eta_c = 80,6\%$ , допустимый кавитационный запас  $\Delta h = 4,6 \text{ м}$ . Расчетная подача входит в рабочий диапазон насоса.

#### 4.4. Расчет коэффициента использования насосной установки

Коэффициент представляет собой соотношение полезной для установки мощности насоса  $N_{\Pi}$ , к потребляемой мощности  $N_C$ :

$$\eta_{исп} = N_{\Pi} / N_C, \quad (6)$$

где  $N_{\Pi} = \rho g Q_p H_p$ ;  $N_C = \frac{\rho g Q_p (H_p + h_s)}{\eta_c}$ .

Из соотношения (6):

$$\eta_{исп} = \frac{H_p}{(H_p + h_s)} \cdot \eta_c, \quad (7)$$

$$\eta_{исп} = \frac{25}{(25 + 2,8)} \cdot 80,6 = 72,48\%.$$

Коэффициент использования насосной установки  $\eta_{исп}$  меньше КПД насоса  $\eta_c$ , так как сопротивление задвижки создает в трубопроводе дополнительные потери напора.

Мощность, потребляемая насосным агрегатом при открытой задвижке:

$$N_{эл} = \frac{N_B}{\eta_{эл}}, \quad (8)$$

где  $N_C$  - мощность насоса, кВт;  $\eta_{эл}$  - КПД электродвигателя определяем по каталогу (можно принять  $\eta_{эл} = 0,88 \dots 0,92$ ).

$$N_{эл} = \frac{120}{0,92} = 130,4 \text{ кВт}.$$

Мощность, потребляемая насосным агрегатом при закрытой задвижке:

$$N_{эл} = \frac{N_C}{\eta_{эл}}, \quad (9)$$

где  $N_C$  - мощность насоса, кВт;  $\eta_{эл}$  - КПД электродвигателя определяем по каталогу (можно принять  $\eta_{эл} = 0,88 \dots 0,92$ ).

$$N_{эл} = \frac{118}{0,92} = 128,3 \text{ кВт}.$$

#### 4.5. Расчет показателей энергетической эффективности

Удельный расход электроэнергии (кВт/м<sup>3</sup>) насоса определяется по формуле

$$N_{уд} = \frac{N_{эл}}{Q_{B(p)}}, \quad (10)$$

где  $N_{эл}$  - мощность потребляемая насосным агрегатом, кВт;  $Q_B$  – подача насоса при открытой задвижке, м<sup>3</sup>/час;  $Q_P$  – расчетная подача насоса при закрытой задвижке, м<sup>3</sup>/час.



По условиям задачи получаем удельный расход электроэнергии насосного агрегата:

- при открытой задвижке

$$N_{y\partial} = \frac{130,4}{1427} = 0,091 \text{ кВт/м}^3 ;$$

- при прикрытой задвижке

$$N_{y\partial z} = \frac{128,3}{1300} = 0,099 \text{ кВт/м}^3 .$$

Удельная стоимость подачи 1 м<sup>3</sup> при стоимости электроэнергии  $a = 5$  руб/кВт

- при открытой задвижке

$$Ц_{y\partial} = 0,091 \cdot 5 = 0,455 \text{ руб/м}^3 ;$$

- при прикрытой задвижке

$$Ц_{y\partial z} = 0,099 \cdot 5 = 0,495 \text{ руб/м}^3$$

## 5. Исходные данные индивидуальных заданий.

Вариант индивидуального задания (таблица 3) содержит типоразмер центробежного насоса без обточка рабочего колеса (Приложение 1) и параметры характеристики трубопровода:  $H_T$  - геометрическая высота подъема воды трубопроводом, м;  $S$  - приведенный коэффициент сопротивления трубопровода, м/(м<sup>3</sup>/час)<sup>2</sup>. Необходимо определить параметры совместной работы насоса и трубопровода при обеспечении в трубопроводе расчетной подачи  $Q_p$ , м<sup>3</sup>/час за счет его регулирования прикрытием напорной задвижки. Выполнить расчет показателей энергетической эффективности при совместной работе насосного агрегата и трубопровода при открытой задвижке и при количественном регулировании прикрытием напорной задвижки на расчетную подачу.

## Варианты индивидуального задания

Таблица 3.

| Вариант | Параметры трубопровода | Типоразмер насоса   |                     |                     |                     |                     |                     |
|---------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|         |                        | Д320-50             | Д500-63             | Д630-90             | Д800-56             | Д1250-63            | Д1600-90            |
| 1       | $H_G, м$               | 22                  | 38                  | 15                  | 28                  | 14                  | 28                  |
|         | $S, м/(м^3/час)^2$     | $3,3 \cdot 10^{-4}$ | $1,3 \cdot 10^{-4}$ | $10^{-4}$           | $0,6 \cdot 10^{-4}$ | $0,3 \cdot 10^{-4}$ | $0,4 \cdot 10^{-4}$ |
|         | $Q_p, м^3/час$         | 200                 | 350                 | 400                 | 600                 | 600                 | 1200                |
| 2       | $H_G, м$               | 21                  | 35                  | 12                  | 23                  | 11                  | 21                  |
|         | $S, м/(м^3/час)^2$     | $3,2 \cdot 10^{-4}$ | $1,2 \cdot 10^{-4}$ | $0,9 \cdot 10^{-4}$ | $0,5 \cdot 10^{-4}$ | $0,2 \cdot 10^{-4}$ | $0,3 \cdot 10^{-4}$ |
|         | $Q_p, м^3/час$         | 250                 | 400                 | 450                 | 700                 | 700                 | 1400                |
| 3       | $H_G, м$               | 19                  | 32                  | 10                  | 19                  | 8                   | 25                  |
|         | $S, м/(м^3/час)^2$     | $3,1 \cdot 10^{-4}$ | $1,1 \cdot 10^{-4}$ | $0,8 \cdot 10^{-4}$ | $0,4 \cdot 10^{-4}$ | $0,2 \cdot 10^{-4}$ | $0,2 \cdot 10^{-4}$ |
|         | $Q_p, м^3/час$         | 300                 | 450                 | 500                 | 800                 | 800                 | 1600                |
| 4       | $H_G, м$               | 15                  | 28                  | 8                   | 22                  | 10                  | 40                  |
|         | $S, м/(м^3/час)^2$     | $2,4 \cdot 10^{-4}$ | $0,8 \cdot 10^{-4}$ | $0,7 \cdot 10^{-4}$ | $0,3 \cdot 10^{-4}$ | $0,1 \cdot 10^{-4}$ | $0,1 \cdot 10^{-4}$ |
|         | $Q_p, м^3/час$         | 350                 | 500                 | 550                 | 900                 | 900                 | 1800                |

**Оформление отчета о работе.**

Отчет должен содержать следующие разделы:

1. Тема работы. Цель работы. Перечень оборудования и приборов. Работа насосной установки.
2. Цель регулирования параметров при совместной работе насоса и трубопровода.
3. Виды и способы регулирования, их преимущества и недостатки.
4. Порядок выполнения расчетов при количественном регулировании параметров совместной работы насос трубопровод степенью открытия напорной задвижки.
5. Расчет по индивидуальному заданию, который должен содержать:
  - исходные данные по типоразмеру насоса и параметрам трубопровода;
  - характеристики насоса заданного типоразмера;
  - расчет характеристики трубопровода при открытой задвижке (таб. 1) и при закрытой задвижке (табл. 2) для обеспечения расчетного расхода;
  - характеристики совместной работы насоса с трубопроводом (рис. 2);
  - параметры совместной работы насоса с трубопроводом при открытой и закрытой задвижке.
6. Выводы о выполнении цели работы.

**Вопросы для самостоятельной работы:**

1. Способы представления характеристик центробежных насосов.
2. Определение рабочих диапазонов параметров по характеристикам насосов.
3. Количественные способы регулирования подачи насоса дросселированием.
4. Определение степени закрытия по характеристике задвижки.
5. Расчет показателей энергетической эффективности

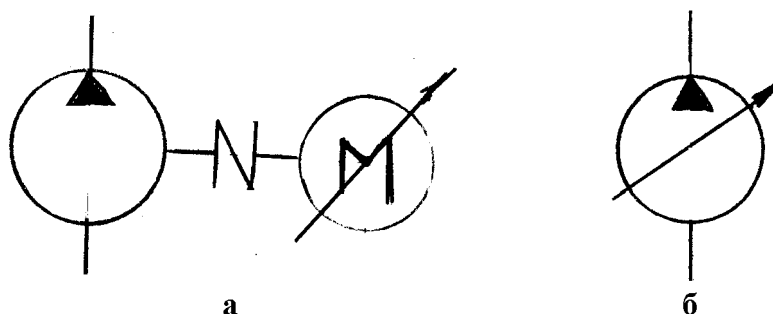
## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОПАСТНЫХ НАСОСОВ ОБТОЧКОЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА

**Цель работы:** Практическое изучение качественных методов регулирования параметров совместной работы центробежного насоса и трубопровода. Способы качественного регулирования. Построить график совместной работы насоса и трубопровода при качественном регулировании обточкой рабочего колеса. Парабола обточек. Влияние коэффициента быстроходности на величину обточки рабочего колеса. Определение потребляемой мощности, КПД и кавитационного запаса насосной установки при обточке рабочего колеса. Выполнение работы по определению параметров регулирования совместной работы центробежный насос трубопровод обточкой рабочего колеса по индивидуальному заданию.

#### 1. Качественные методы регулирования параметров совместной работы насоса и трубопровода

Качественный метод регулирования параметров совместной работы насоса и трубопровода заключается в изменении напорной характеристики насоса. Этот метод может реализовываться за счет изменения геометрических или кинематических параметров центробежного насоса (рис.1). Изменение геометрических параметров центробежного насоса может обеспечиваться за счет изменения открытия направляющих аппаратов либо обточкой рабочего колеса. Изменение кинематических параметров обеспечивается изменением частоты вращения рабочего колеса. Диапазон изменения параметров при совместной работе насоса и трубопровода определяется характеристиками насоса. На практике целесообразно выбирать режимы регулирования при которых обеспечивается наибольший КПД при минимальных затратах.



*Рис. 1. Методы качественного регулирования совместной работы центробежного насоса и трубопровода: а – изменением кинематических параметров; б – изменением геометрических параметров*

Из уравнения Эйлера следует, что удельная энергия, передаваемая потоку жидкости в рабочем колесе центробежного насоса, существенно зависит от условий входа на рабочие лопасти и выхода с них. Изменение геометрических

параметров выполняется для центробежных насосов, которые работают с постоянным числом оборотов рабочего колеса. Изменение степени открытия направляющих аппаратов является непрерывным и наиболее экономичным методом регулирования, так как в этом случае значительно уменьшаются потери мощности. Однако осуществление такого метода регулирования требует сложной и специальной конструкции насосов.

## 2. Изменение характеристик насоса обточкой рабочего колеса

Характеристики лопастного насоса  $N = f(Q)$  и  $H = f(Q)$  определяются при определенных диаметре и частоте вращения рабочего колеса.

При заданной частоте вращения рабочего колеса  $n = const$  характеристики центробежного насоса изменяются при уменьшении наружного диаметра рабочего колеса, которое обеспечивается его *обточкой*. При уменьшении наружного диаметра рабочего колеса окружная скорость на выходе уменьшается, следовательно, уменьшается напор и подача лопастного насоса. Поэтому напорная характеристика насоса смещается вниз и влево, как показано на рис. 2.

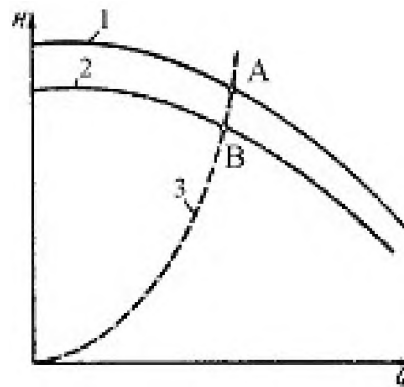


Рис. 2. Изменение характеристики центробежного насоса при обточке рабочего колеса:  
1 - до обточки, 2 - после обточки, 3 - парабола обточки

По формулам пропорциональности для модельного и натурального насоса их напорная и энергетическая характеристики связаны между собой зависимостями при определенных диаметре и частоте вращения рабочего колеса.

$$\frac{Q_o}{Q_m} = \frac{n_o}{n_m} \cdot \left(\frac{D_o}{D_m}\right)^3, \quad \frac{H_o}{H_m} = \left(\frac{n_o}{n_m}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_o}{D_m}\right)^2 \quad \text{и} \quad \frac{N_o}{N_m} = \left(\frac{n_o}{n_m}\right)^3 \cdot \left(\frac{D_o}{D_m}\right)^5$$

При уменьшении только диаметра рабочего колеса режимы гидродинамического подобия потоков в лопастном насосе нарушаются, так как изменяется геометрическое подобие. Поэтому изменения его характеристик невозможно определить по формулам пропорциональности.

Экспериментально установлено, что при обточке рабочего колеса

$$\frac{Q}{Q^*} = \frac{D_2}{D_2^*}, \quad \frac{H}{H^*} = \left(\frac{D_2}{D_2^*}\right)^2, \quad (1)$$

где  $D_2, D_2^*$  - диаметры рабочего колеса до обточки и после,  $Q, Q^*$  и  $H, H^*$  - соответственно подачи и напоры насоса до и после обточки рабочего колеса.

С учетом зависимости (1) напорные характеристики лопастного насоса для различных диаметров рабочих колес, то есть при их обточке, расположены на параболе вершина, которой расположена в начале координат. Такая парабола называется **параболой обточек** и описывается зависимостью

$$H = k \cdot Q^2 \quad (2)$$

где  $k = H_P / Q_P^2$  - коэффициент параболы обточек при расчетном режиме.

Экспериментально установлено, что полный КПД насоса после обточки

$$\eta^* = 1 - (1 - \eta) \cdot \left(\frac{D^*}{D}\right), \quad (3)$$

где  $\eta$  - полный КПД насоса с необточенным рабочим колесом.

Следовательно, при уменьшении диаметра рабочего колеса при нарушении гидродинамического подобия в лопастном насосе минимальная величина обточка ограничивается максимально допустимым падением КПД. На степень уменьшения КПД существенно влияет коэффициент быстроходности насоса, который определяется по зависимости

$$n_s = 3.65 \cdot n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}} \quad (4)$$

где  $n$  - частота вращения рабочего колеса, об/мин,  $Q$  - подача в м<sup>3</sup>/с,  $H$  - напор, м.

Предельные величины обточек рабочего колеса в зависимости от коэффициента быстроходности лопастного насоса определяются по таблице 1.

Предельные величины обточек рабочего колеса

Таблица 1.

|                       |      |      |      |      |      |
|-----------------------|------|------|------|------|------|
| $n_s$                 | 60   | 120  | 200  | 300  | 350  |
| $(D_2 - D_2^*) / D_2$ | 0.20 | 0.15 | 0.11 | 0.09 | 0.07 |

На рис. 2 приведены графики, которые образуют рабочее поле для центробежного насоса при обточке рабочего колеса, где показано:  $P$  - рабочая точка при не обточенном колесе;  $Q_A, Q_P, Q_B$  - соответственно минимальная, рабочая, максимальная подача в рабочей зоне при не обточенном рабочем колесе. Заштрихованный прямоугольник определяет рабочее поле насоса при обточке рабочего колеса. Верхняя граница  $AB$  соответствует напорной характеристике насоса при не обточенном рабочем колесе, нижняя граница  $CF$

напорной характеристике при максимально допустимой обточке. Пределы рабочих полей насоса по подаче выбираются из условий, ограничения допускаемых значений КПД

$$\eta_{\text{дон}} = (0,85 \dots 0,95) \cdot \eta_{\text{max}}, \quad (5)$$

где  $\eta_{\text{max}}$  – максимальное значение КПД.

Правая **FB** и левая **CA** границы рабочего поля на рис. 2 образуются параболой обточки и определяются из условия недопустимого снижения КПД. При обточке рабочего колеса изменяются условия гидродинамического подобия, поэтому для определения границ рабочего поля необходимо также учитывать возможность возникновения кавитации в потоке жидкости, движущемся по всасывающему трубопроводу, подводу и на входе в рабочее колесо насоса. Поэтому в паспортных характеристиках центробежных насосов (Приложения) левая и правая границы четырехугольников рабочего поля при обточке ограничивают из условия недопустимого снижения КПД и допустимой высоты всасывания.

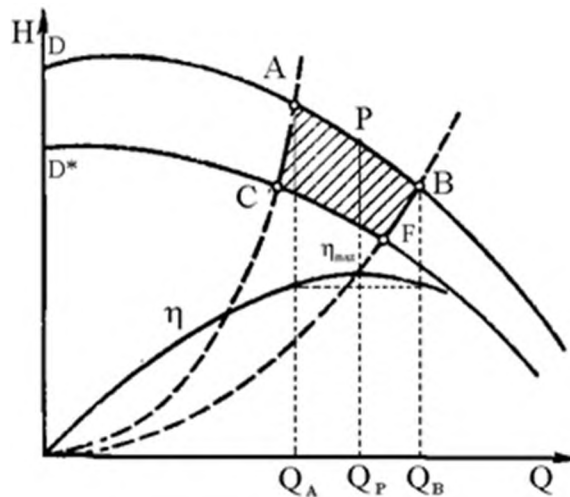


Рис. 3. Рабочее поле напорных характеристик лопастного насоса при обточке рабочего колеса

### 3. Порядок выполнения работы

Для заданного типоразмера насоса, его напорной характеристике и напорно-расходной характеристике трубопровода определяется режим их совместной работы. Определяются по напорной характеристике насоса и характеристике трубопровода параметры рабочей точки по подаче, напору, мощности, КПД и кавитационному запасу. Для заданного расчетного расхода в трубопроводе определяются параметры его параболы обточек.

### 4. Пример выполнения задания работы.

**4.1. Задание.** Центробежный насос Д560-65а с диаметром не обточенного рабочего колеса  $D=465$  мм работает совместно с трубопроводом с параметрами  $H_T=15$  м - геометрическая высота подъема воды трубопроводом;  $S = 1,61 \cdot 10^{-4}$

$\text{м}/(\text{м}^3/\text{час})^2$  – либо  $S = 20,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}/(\text{л}/\text{с})^2$  - приведенные коэффициенты сопротивления трубопровода. Заданный расчетный расход в трубопроводе  $Q_p = 120 \text{ л}/\text{с}$  ( $432 \text{ м}^3/\text{час}$ ). Определить параметры совместной работы насоса и трубопровода, необходимый диаметр обточенного рабочего колеса для обеспечения расчетного расхода и пересчитать его напорную характеристику.

#### 4.2. Построение характеристик насоса с не обточенным рабочим колесом и сети при их совместной работе

По заданному типоразмеру по каталогу насосов находим графическое изображение характеристик насоса Д560-65а с диаметром рабочего колеса  $D=465 \text{ мм}$ , с частотой вращения рабочего колеса  $n = 1450 \text{ об}/\text{мин}$ . Характеристики насоса представляют в табличной форме для 10 точек напорной характеристики насоса в рабочем интервале подач, которую представим в таблице 2 и на рис. 4.

Напорно-расходная характеристика трубопровода для подач в  $\text{л}/\text{с}$  записывается в виде

$$H_m = H_{\Gamma} + S \cdot Q^2 = 15 + 20,8 \cdot Q^2 \cdot 10^{-4}, \text{ м}$$

Подставим в характеристику трубопровода 10 значения подач в диапазоне значений подач характеристик насоса. Результаты расчета характеристики трубопровода приведем в табличной форме (таблица 2)

Напорная характеристика насоса и результаты расчета характеристики трубопровода  
Таблица 2.

| $Q,$<br>$\text{л}/\text{с}$ | 0  | 20   | 40   | 60   | 80   | 100  | 120 | 140  | 160  | 180  | 200  |
|-----------------------------|----|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|
| $H_H,$<br>$\text{м}$        | 69 | 72   | 74   | 75   | 74   | 72   | 69  | 65   | 60   | 54   | 48   |
| $H_m,$<br>$\text{м}$        | 15 | 15,8 | 18,3 | 22,5 | 28,3 | 35,8 | 45  | 55,8 | 68,2 | 82,4 | 98,2 |

Построим напорную характеристика насоса и нанесем на нее полученную характеристику трубопровода, как показано на рис. 2. Точка пересечения напорной характеристики насоса и характеристики трубопровода является рабочей точкой устойчивой работы насосной установки с параметрами подача  $Q_H = 142,5 \text{ л}/\text{с}$  и напор  $H_H = 61,8 \text{ м}$ . Следовательно, при совместной работе насоса с не обточенным рабочим колесом и трубопровода подача насоса значительно больше, чем расчётная  $Q_p = 120 \text{ л}/\text{с}$ . Для обеспечения расчетной подачи в трубопроводе выполним расчет напорной характеристики насоса с обточенным рабочим колесом.



### 4.3. Построение характеристик насоса с обточенным рабочим колесом и сети при их совместной работе

Для определения предельных величин обточек рабочего колеса по формуле (4) определим значение коэффициента быстроходности выбранного насоса, с учетом того, что для насосов с двусторонним подводом принимается половина подачи:

$$n_s = 3,65 \cdot 1450 \cdot \sqrt{\frac{560}{2 \cdot 3600}} \cdot \frac{1}{65^{3/4}} = 60,9$$

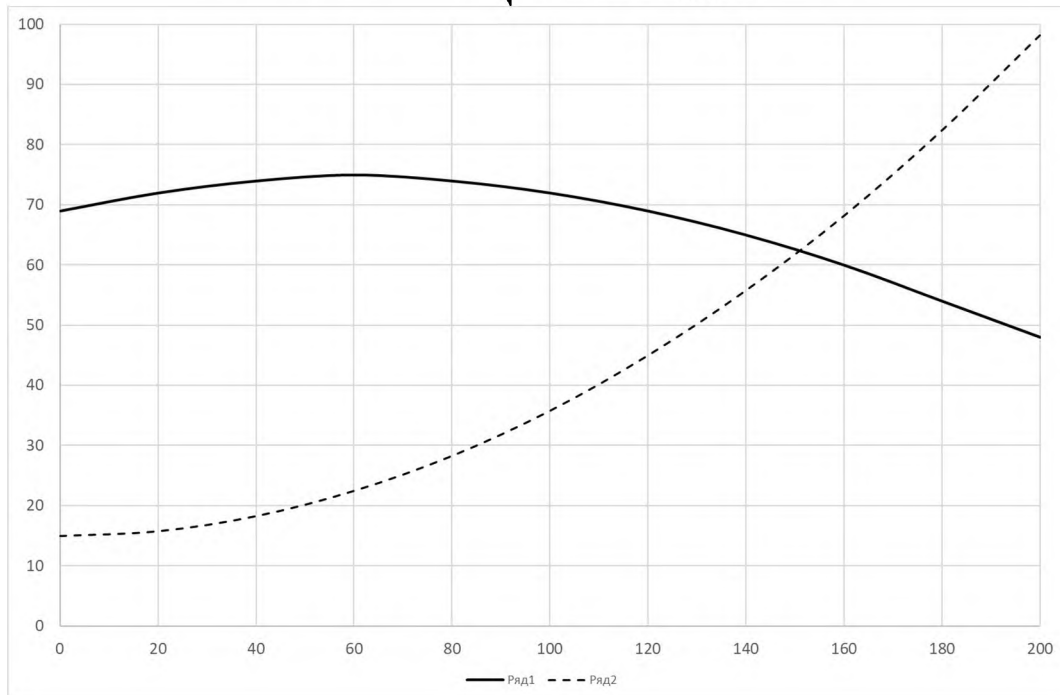


Рис. 4. Графики совместной работы насоса и трубопровода

По формуле определим значение коэффициента быстроходности выбранного насоса, с учетом того, что для насосов с двусторонним подводом принимается половина подачи:

$$n_s = 3,65 \cdot 1450 \cdot \sqrt{\frac{500}{2 \cdot 3600}} \cdot \frac{1}{65^{3/4}} = 60,92$$

По значению коэффициента быстроходности по таблице 1, определим, что допустимое максимальное значение обточки колеса насоса при  $n_s = 60$  составляет 20%, для которых справедливы расчетные зависимости (1) для напоров и подач при обточке рабочего колеса.

По зависимости (2) определим коэффициент параболы обточек

$$k = \frac{45}{120^2} = 0,003125 \text{ м} \cdot \text{с}^2 / \text{л}^2$$

Парабола обточек для данной задачи описывается зависимостью

$$H_o = 31,3 \cdot Q^2 \cdot 10^{-4}, \text{ м}$$

Задаваясь значениями  $Q$  для заданного диапазона подач, который рассматривался в таблице 2, определяем значения  $H_o$ , которые представим в таблице 3 и по полученным точкам строим параболу обточек на рис. 5.

Находим на рис 5 точку пересечения параболы обточек с напорной характеристикой насоса с не обточенным рабочим колесом при нормальном диаметре рабочего колеса  $D=465$  мм. Этой точке соответствует подача  $Q=142,5$  л/с, и напор  $H=63,5$  м.

Диаметр обточенного рабочего колеса находим из соотношения для подач по формуле (1) по которым напорные характеристики насоса пересекаются с параболой обточек

$$D^* = D \frac{Q^*}{Q} = 465 \cdot \frac{120}{142,5} = 392 \text{ мм.}$$

Определяем относительную величину обточки рабочего колеса и сравниваем с допустимой

$$\frac{465 - 392}{465} \cdot 100 = 15,7\% < 20\%$$

Следовательно, обточка колеса составляет 15,7%, что допустимо для рабочего колеса данного насоса по его коэффициенту быстроходности. Относительная величина обточенного рабочего колеса

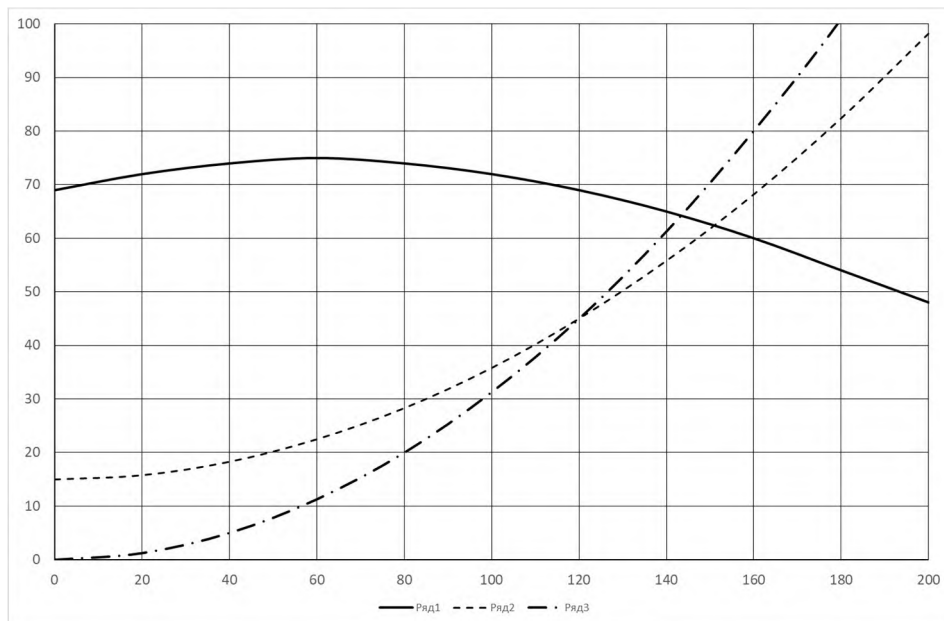
$$\frac{D}{D} = \frac{392}{465} = 0,843.$$

#### 4.4. Расчет напорной характеристики насоса с обточенным колесом

По значениям подач и напоров для напорной характеристики насоса с не обточенным рабочим колесом и трубопровода из таблицы 2 вычислим значения параболы обточек по формуле (2) и напорной характеристики насоса с обточенным рабочим колесом до диаметра  $D_{об} = 392 \text{ мм}$  по формулам (1). Результаты расчета совместной работы насоса и трубопровода приведем в таблице 3 и по ним строим новую напорную характеристику насоса с обточенным рабочим колесом, которую покажем на рис. 6.

Характеристики совместной работы трубопровода и насоса  
с обточенным и не обточенным рабочим колесом  
Таблица 3.

|             |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $Q$ , л/с   | 0  | 20   | 40   | 60   | 80   | 100  | 120  | 140  | 160  | 180  | 200  |
| $H_H$ , м   | 69 | 72   | 74   | 75   | 74   | 72   | 69   | 65   | 60   | 54   | 48   |
| $H_m$ , м   | 15 | 15,8 | 18,3 | 22,5 | 28,3 | 35,8 | 45   | 55,8 | 68,2 | 82,4 | 98,2 |
| $H_o$ , м   | 0  | 1,25 | 5,01 | 11,3 | 20,0 | 31,3 | 45   | 61,3 | 80,1 | 101  | 125  |
| $Q^*$ , л/с | 0  | 16,8 | 33,6 | 50,4 | 67,2 | 84   | 101  | 118  | 134  | 151  | 168  |
| $H^*$ , м   | 49 | 51,1 | 52,3 | 53,3 | 52,5 | 51,1 | 49   | 46,2 | 42,6 | 38,3 | 34,1 |
| $H_m^*$ , м | 15 | 15,6 | 17,3 | 20,3 | 24,4 | 29,7 | 36,2 | 44,0 | 52,3 | 62,4 | 73,7 |
| $H_o^*$ , м | 0  | 0,88 | 3,53 | 7,95 | 14,1 | 22,1 | 31,9 | 43,6 | 56,2 | 71,4 | 88,3 |



*Рис. 5. Характеристики совместной работы трубопровода и насоса с не обточенным рабочим колесом*

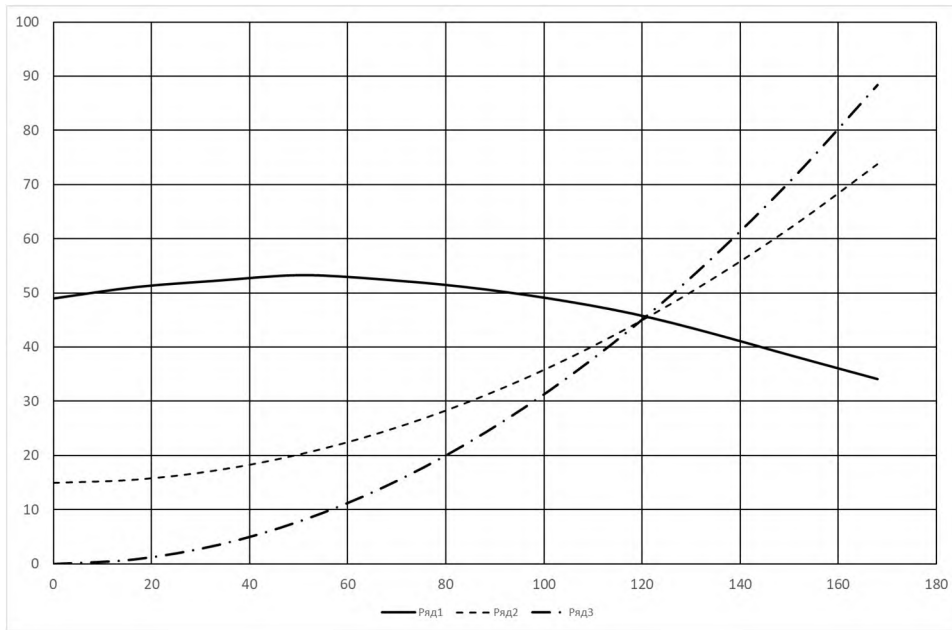


Рис.6. Характеристики совместной работы трубопровода и насоса с обточенным рабочим колесом

#### 4.5. Определение параметров совместной работы трубопровода и насоса с не обточенным и обточенным рабочим колесом

По характеристикам насоса (рис. 7) по подаче *при не обточенном колесе*  $Q_H = 142,5$  л/с определим его параметры: напор  $H = 62$  м, мощность  $N = 125$  кВт; КПД  $\eta = 75\%$  и допустимый кавитационный запас  $\Delta h_B = 4,6$  м.

По характеристикам насоса (рис. 6) по подаче *при обточенном колесе*  $Q_0 = 120$  л/с, напор  $H = 45$  м. Остальные параметры определим по формулам пропорциональности для модельного и натурального насоса с учетом сохранения частоты вращения

$$\frac{N_0}{N_m} = \left(\frac{D_0}{D_m}\right)^3 \quad \text{и} \quad \eta^* = 1 - (1 - \eta) \cdot \left(\frac{D^*}{D}\right)$$

$$N = 125 \cdot (0,843)^3 = 74,9 \text{ кВт; КПД } \eta = 79\%.$$

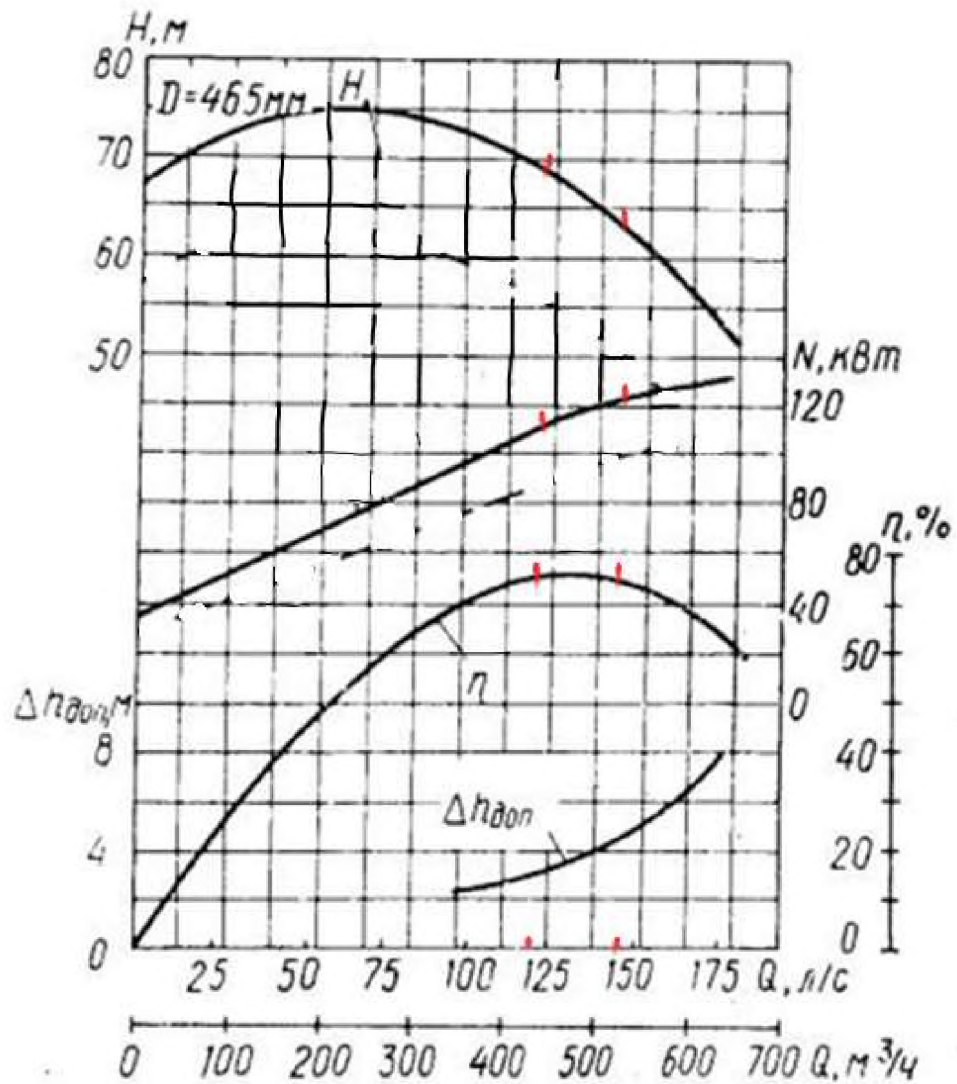


Рис. 7. Характеристики насоса Д560-65а.

#### 4.6. Расчет потребляемой мощности насосной установки

Мощность, потребляемая насосным агрегатом при не обточенном рабочем колесе:

$$N_{\text{эл}} = \frac{N_{\text{н}}}{\eta_{\text{эл}}},$$

где  $N_{\text{с}}$  - мощность насоса, кВт;  $\eta_{\text{эл}}$  - КПД электродвигателя определяем по каталогу (можно принять  $\eta_{\text{эл}} = 0,88 \dots 0,92$ ).

$$N_{\text{эл}} = \frac{125}{0,9} = 138,9 \text{ кВт}.$$

Мощность, потребляемая насосным агрегатом при обточенном рабочем колесе:

$$N_{\text{эл}} = \frac{N_{\text{о}}}{\eta_{\text{эл}}},$$

где  $N_c$  - мощность насоса, кВт;  $\eta_{эл}$  - КПД электродвигателя определяем по каталогу (можно принять  $\eta_{эл} = 0,88...0,92$ ).

$$N_{эл} = \frac{74,9}{0,9} = 83,2 \text{ кВт}.$$

#### 4.7. Расчет показателей энергетической эффективности

Удельный расход электроэнергии (кВт/м<sup>3</sup>) насоса определяется по формуле

$$N_{уд} = \frac{N_{эл}}{Q_{H(o)}}, \quad (10)$$

где  $N_{эл}$  - мощность потребляемая насосным агрегатом, кВт;  $Q_H$  – подача насоса при не обточенном рабочем колесе, м<sup>3</sup>/час;  $Q_o$  – расчетная подача насоса при обточенном колесе, м<sup>3</sup>/час.

По условиям задачи получаем:

- подача насоса при не обточенном рабочем колесе

$$Q_H = 142,5 \cdot 3600 = 513 \text{ м}^3/\text{час}$$

- удельный расход электроэнергии насосного агрегата при не обточенном колесе

$$N_{уд} = \frac{138,9}{513} = 0,271 \text{ кВт}/\text{м}^3;$$

- подача насоса при обточенном рабочем колесе

$$Q_H = 120 \cdot 3600 = 432 \text{ м}^3/\text{час}$$

- удельный расход электроэнергии насосного агрегата при обточенном колесе

$$N_{уд} = \frac{83,2}{432} = 0,193 \text{ кВт}/\text{м}^3;$$

Удельная стоимость подачи 1 м<sup>3</sup> при стоимости электроэнергии  $a = 5$  руб/кВт

- при не обточенном колесе

$$Ц_{уд} = 0,271 \cdot 5 = 1,355 \text{ руб}/\text{м}^3;$$

- при обточенном рабочем колесе

$$Ц_{уд} = 0,193 \cdot 5 = 0,965 \text{ руб}/\text{м}^3$$

## 5. Исходные данные индивидуальных заданий

Вариант индивидуального задания (таблица 3, практическая работа №8) содержит типоразмер центробежного насоса без обточки рабочего колеса (Приложение 1) и параметры характеристики трубопровода:  $H_T$  - геометрическая высота подъема воды трубопроводом, м;  $S$  - приведенный коэффициент сопротивления трубопровода,  $\text{м}/(\text{м}^3/\text{час})^2$ . Необходимо определить параметры совместной работы насоса и трубопровода при обеспечении в трубопроводе расчетной подачи  $Q_p$ ,  $\text{м}^3/\text{час}$  за счет обточки рабочего колеса.

### Оформление отчета о работе

Отчет должен содержать следующие разделы:

1. Тема работы. Цель работы.
2. Цель регулирования параметров при совместной работе насоса и трубопровода.
3. Виды и способы качественного регулирования, их преимущества и недостатки.
4. Порядок выполнения расчетов при качественном регулировании параметров совместной работы системы насос трубопровод обточкой рабочего колеса.
5. Расчет по индивидуальному заданию, который должен содержать:
  - исходные данные по типоразмеру насоса и параметрам трубопровода;
  - характеристики насоса заданного типоразмера;
  - расчет напорно-расходной характеристики трубопровода;
  - графики совместной работы трубопровода и насоса с не обточенным рабочим колесом (рис.4);
  - определение коэффициента быстроходности насоса и допустимой величины обточки;
  - определение параметров параболы обточки и степени обточки рабочего колеса (рис. 5);
  - параметры совместной работы трубопровода с насосом с обточенным рабочим колесом.
6. Выводы о выполнении цели работы.

### Вопросы для самостоятельной работы:

1. Способы представления характеристик центробежных насосов в зависимости от степени обточки рабочего колеса.

2. Определение границ рабочего поля центробежного насоса по условию возможного возникновения кавитационных режимов в насосе и трубопроводах.
3. Определение границ рабочего поля центробежного насоса по условию недопустимым снижением КПД.
4. Определение мощности, КПД центробежного насоса при обточке рабочего колеса.
5. Расчет показателей энергетической эффективности



**ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3**  
**ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ**  
**ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ**  
**(ИНТЕГРАЛЬНЫЙ СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ)**

**Цель работы:** Практическое изучение качественного метода регулирования параметров совместной работы центробежного насоса и трубопровода за счет изменения частоты вращения рабочего колеса. Построить график совместной работы насоса и трубопровода при регулировании изменением частоты вращения рабочего колеса. Парабола подобных режимов. Определение потребляемой мощности, КПД и кавитационного запаса насосной установки при регулировании частоты вращения рабочего колеса. Ознакомиться с примером расчета. Выполнение работы по определению параметров регулирования совместной работы центробежный насос трубопровод при регулировании частоты вращения рабочего колеса по индивидуальному заданию.

**1. Влияние частоты вращения рабочего колеса на параметры и характеристики центробежного насоса**

При обеспечении условий гидродинамического подобия параметры лопастного насоса  $Q, H, N$  связаны с диаметром и частотой вращения рабочего колеса формулами пропорциональности:

$$\frac{Q_o}{Q_m} = \frac{n_o}{n_m} \cdot \left(\frac{D_o}{D_m}\right)^3, \quad \frac{H_o}{H_m} = \left(\frac{n_o}{n_m}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_o}{D_m}\right)^2 \quad \text{и} \quad \frac{N_o}{N_m} = \left(\frac{n_o}{n_m}\right)^3 \cdot \left(\frac{D_o}{D_m}\right)^5 \quad (1)$$

При изменении частоты вращения рабочего колеса при одинаковых диаметрах рабочих колес  $D_o = D_m$  сохраняется гидродинамическое подобие насоса, так как сохраняется геометрическое и кинематическое подобие. Поэтому при пересчете параметров и характеристик центробежного насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса применяют формулы пропорциональности в виде:

$$\frac{Q_o}{Q_m} = \frac{n_o}{n_m}, \quad \frac{H_o}{H_m} = \left(\frac{n_o}{n_m}\right)^2 \quad \text{и} \quad \frac{N_o}{N_m} = \left(\frac{n_o}{n_m}\right)^3 \quad (2)$$

Для насоса заданного типоразмера при его известной напорной характеристике  $H = f(Q)$  и частоте вращения рабочего колеса его напорная характеристики изменяются при изменении частоты вращения в соответствии с формулами пропорциональности (2). Исключая из этих зависимостей отношение частот вращения рабочего колеса  $n_o/n_m$  получим, что при различных их частотах вращения, параметры насоса связаны зависимостью

$$\frac{H_0}{H_m} = \left( \frac{Q_0}{Q_m} \right)^2 \quad (3)$$

После преобразований получим, что при изменении частоты вращения рабочего колеса параметры насоса связаны отношениями

$$\frac{H_0}{Q_0^2} = \frac{H_m}{Q_m^2} = a = const \quad (4)$$

Из этих соотношений следует, что параметры напорных характеристик при различных частотах вращения рабочего колеса зависят по формуле

$$H = a \cdot Q^2. \quad (5)$$

где  $a = H_p / Q_p^2$  - коэффициент параболы подобных режимов.

То есть напорные характеристики лопастного насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса расположены на **параболах подобных режимов**. Вершина параболы расположена в начале координат. Применяя формулы пропорциональности, по опытной напорной характеристике насоса при заданной частоте вращения рабочего колеса  $H = f(Q)$  по выбранным параметрам расчетного режима строят ряд характеристик для измененных частот вращения.

Напорные характеристики при двух частотах вращения рабочего колеса показаны на рис. 1.

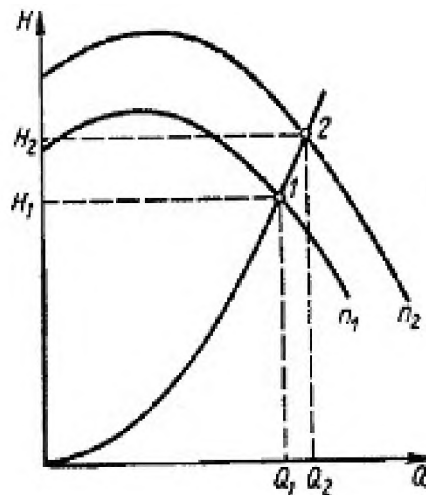


Рис. 1. Изменение напорных характеристики центробежного насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса

Согласно формулам пропорциональности (2) насоса для параметров энергетической характеристики получим зависимость

$$N = b \cdot Q^3. \quad (6)$$

При известной напорной характеристике насоса  $H_1 = f(Q_1)$  при частоте вращения рабочего колеса  $n_1$  с рабочими параметрами  $H_1$  и  $Q_1$  то при измененной частоте вращения рабочего колеса  $n_2$  напорную характеристику  $H_2 = f(Q_2)$  пересчитывают по зависимости

$$Q_2 = i \cdot Q_1, \quad H_2 = i^2 \cdot H_1, \quad (7)$$

где  $i = n_2/n_1$  - степень изменения частоты вращения рабочего колеса.

При изменении частоты вращения и диаметра лопастной насос не сохраняет постоянного КПД. Так как при увеличении частоты вращения гидравлические потери напора пропорциональны ее квадрату. Увеличение частоты вращения также уменьшает допускаемую высоту всасывания насоса. Поэтому изменять частоту вращения необходимо с учетом изменения КПД, как показано на рис. 2. Относительная энергетическая характеристика насоса  $\eta_2 = f(Q)$  при изменении частоты вращения рабочего колеса пересчитывается по формуле

$$\eta_2 = 100 - \frac{100 - \eta_1}{i^{0,2}}, \quad (8)$$

где значения КПД -  $\eta$  - в %.

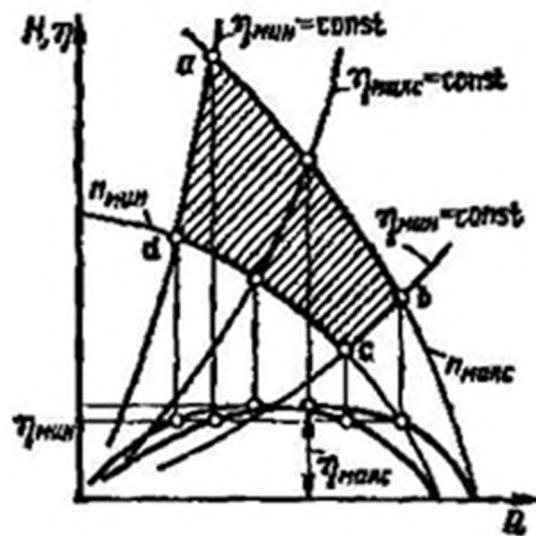


Рис. 2. Рабочее поле центробежного насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса с учетом изменения КПД

Абсолютная энергетическая характеристика насоса  $N_2 = f(Q)$  при изменении частоты вращения рабочего колеса насоса пересчитывается по формуле

$$N_2 = \frac{0,273 \cdot Q_2 \cdot H_2}{\eta_2} = \frac{N_1 \cdot i^3}{\eta_2}, \quad (9)$$

где  $Q$  - в м<sup>3</sup>/час,  $H$  - в м,  $\eta$  - в %.

Кавитационные характеристики насоса  $\Delta h_2 = f(Q)$  при изменении частоты вращения связаны зависимостью

$$\Delta h_2 = \Delta h_1 \cdot i \quad (10)$$

Для регулирования параметров совместной работы трубопровода и лопастного насоса путем изменения частоты вращения рабочего колеса необходимы специальные системы его привода. Большинство насосных установок с центробежными насосами приводится в движение короткозамкнутыми электродвигателями трехфазного тока, изменять частоту вращения вала которых обеспечивается специальными электронными устройствами – преобразователями частоты тока, которые обеспечивают плавное изменение частоты вращения рабочего колеса. Также для плавного изменения частоты вращения вала насоса используются гидравлические или электромагнитные муфты, устанавливаемые между насосом и электродвигателем. Для ступенчатого изменения частоты вращения рабочего колеса применяют многоскоростные асинхронные электродвигатели либо механический привод с коробкой скоростей. В отличие от способа регулирования параметров насоса при постоянной частоте вращения рабочего колеса данный способ регулирования дает возможность регулировать подачу в любом направлении.

## 2. Пример выполнения задания работы.

**Задание.** Центробежный насос Д2000-34 с частотой вращения рабочего колеса  $n_H = 730$  об/мин работает совместно с трубопроводом с параметрами  $H_T = 17$  м - геометрическая высота подъема воды трубопроводом;  $S = 1,48 \cdot 10^{-6}$  м/(м<sup>3</sup>/час)<sup>2</sup> — приведенные коэффициенты сопротивления трубопровода. Заданный расчетный расход в трубопроводе  $Q_p = 1600$  м<sup>3</sup>/час. Определить параметры совместной работы насоса и трубопровода, необходимую частоту вращения рабочего колеса для обеспечения расчетного расхода и пересчитать его напорную и энергетическую характеристику.

## 3. Построение характеристик насоса с исходной частотой вращения и сети при их совместной работе

По заданному типоразмеру из каталога насосов находим графическое изображение характеристик насоса Д2000-34 с частотой вращения рабочего колеса  $n = 730$  об/мин. Характеристики насоса представим в табличной форме для 8 точек напорной и энергетических характеристики насоса в рабочем интервале подач, которые представим в таблице 1, на рис. 3,4 и 5.

Напорно-расходная характеристика трубопровода для подач в м<sup>3</sup>/час записывается в виде

$$H_m = H_T + S \cdot Q^2 = 17 + 1,48 \cdot Q^2 \cdot 10^{-6}. \quad (11)$$

Подставим в эту характеристику трубопровода 8 значений подач в диапазоне значений подач рабочего поля характеристик насоса.

Результаты расчета характеристики трубопровода приведем в табличной форме (таблица 1) и графической форме на рис. 3.

Напорная характеристика насоса при номинальной частоте вращения и результаты расчета характеристики трубопровода  
Таблица 1.

| Q, м <sup>3</sup> /час | 0    | 400  | 800  | 1200 | 1600 | 2000 | 2400 | 2800 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $H_H, м$               | 41,0 | 42,1 | 41,3 | 39,5 | 36,7 | 32,5 | 28,0 | 23,5 |
| $H_m, м$               | 17,0 | 17,2 | 17,9 | 19,1 | 20,8 | 22,9 | 25,5 | 28,6 |
| $N, кВт$               | 52,0 | 60,3 | 68,9 | 76,9 | 84,2 | 90,7 | 97,3 | 103  |
| $\eta, \%$             | 0    | 33,5 | 59,4 | 77,4 | 87,6 | 88,5 | 84,6 | 78,1 |

Построим напорную характеристика насоса и нанесем на нее полученную характеристику трубопровода, как показано на рис. 3. Точка пересечения напорной характеристики насоса и характеристики трубопровода является рабочей точкой устойчивой работы насосной установки с параметрами подача  $Q_H = 2530$  м<sup>3</sup>/час и напор  $H_H = 26,5$  м. Следовательно, при совместной работе насоса при частоте вращения рабочего колеса  $n = 730$  об/мин и трубопровода подача насоса значительно больше, чем расчётная  $Q_p = 1600$  м<sup>3</sup>/час. Для обеспечения расчетной подачи в трубопроводе выполним расчет напорной характеристики насоса при измененной частоте вращения рабочего колеса.

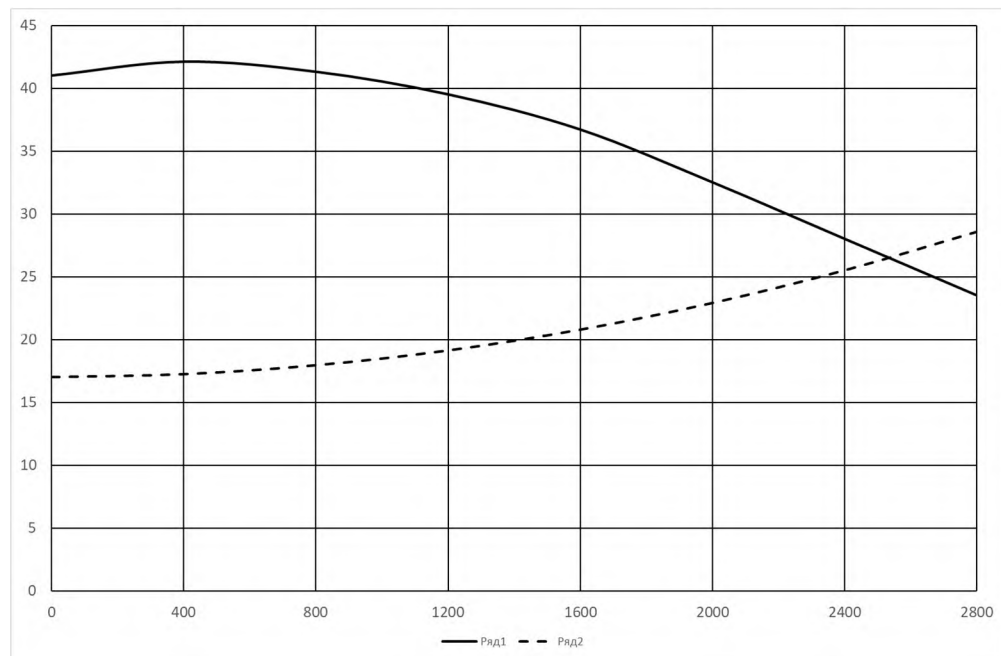


Рис. 3. Совместная напорная характеристика насоса Д2000-34 и трубопровода

По табличным данным таблицы 1 построим энергетические характеристики для мощности насоса (рис. 4) и его КПД (рис.5) в зависимости от его подачи. По графику определим, что в рабочей точке при подаче  $Q_H = 2530$  м<sup>3</sup>/час мощность насоса составляет  $N_H = 99,2$  кВт при частоте вращения рабочего колеса  $n = 730$  об/мин, и КПД -  $\eta = 82,7\%$

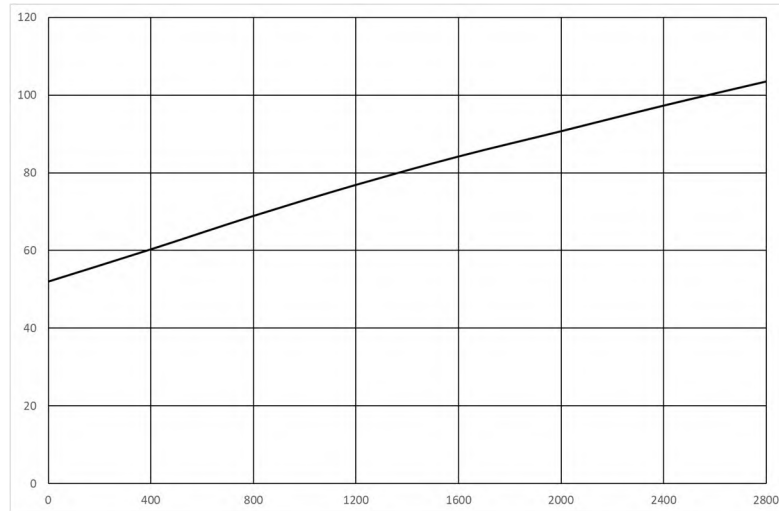


Рис. 4. Абсолютная энергетическая характеристика насоса Д2000-34 в кВт

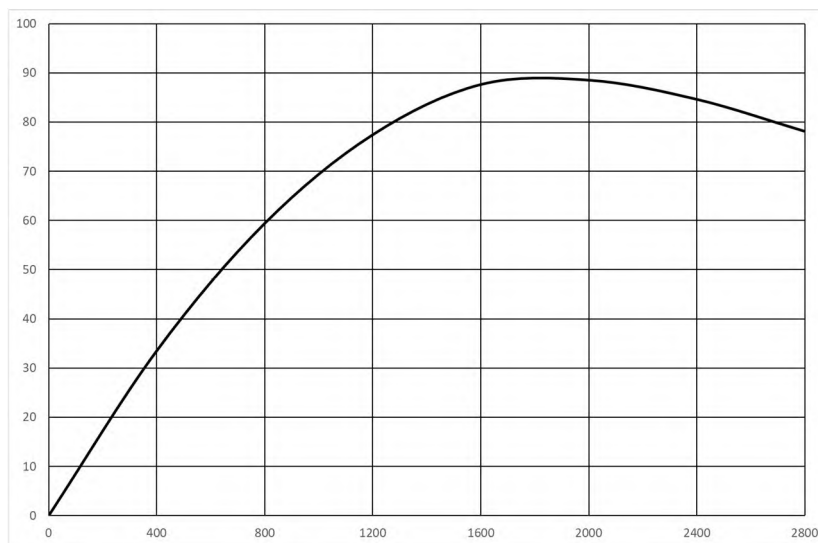


Рис. 5. Относительная энергетическая характеристика насоса Д2000-34 в %

#### 4. Построение характеристик насоса с измененной частотой вращения рабочего колеса и трубопровода при их совместной работе

Для определения степени изменения частоты вращения рабочего колеса определим параметры трубопровода с которыми должна работать насосная установка. По характеристике трубопровода (11) определим, что при расчетном расходе в трубопроводе  $Q_p = 1600 \text{ м}^3/\text{час}$  расчетный напор должен составлять  $H_p = 20,8 \text{ м}$ .

По значениям расчетного расхода и напора определим по формуле (5) коэффициент параболы подобных режимов

$$a = \frac{20,8}{1600^2} = 8,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}/(\text{м}^2/\text{час})^2.$$

Парабола подобных режимов для данной задачи описывается зависимостью

$$H_{\text{п}} = 8,13 \cdot Q^2 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$$

Задаваясь значениями  $Q$  для заданного диапазона подач, который рассматривался в таблице 1, определяем значения напоров параболы подобных режимов  $H_0$ , которые представим в таблице 2 и по полученным точкам строим параболу подобных режимов на рис. 6.

Парабола подобных режимов совместно с напорной характеристикой насоса и характеристикой трубопровода  
Таблица 2.

|                            |      |      |      |      |             |      |      |
|----------------------------|------|------|------|------|-------------|------|------|
| $Q, \text{м}^3/\text{час}$ | 0    | 400  | 800  | 1200 | <b>1600</b> | 2000 | 2400 |
| $H_n, \text{м}$            | 41,0 | 42,1 | 41,3 | 39,5 | <b>36,7</b> | 32,5 | 28,0 |
| $H_m, \text{м}$            | 17,0 | 17,2 | 17,9 | 19,1 | <b>20,8</b> | 22,9 | 25,5 |
| $H_p, \text{м}$            | 0    | 1,31 | 5,2  | 11,7 | <b>20,8</b> | 32,5 | 46,8 |

Парабола подобных режимов пересекает напорную характеристику насоса в точке с параметрами: подача  $Q_H = 2000 \text{ м}^3/\text{час}$  и напор  $H_H = 32,5 \text{ м}$ , а напорно-расходную характеристику трубопровода в точке с параметрами: подача  $Q_m = 1600 \text{ м}^3/\text{час}$  и напор  $H_m = 20,8 \text{ м}$ . На основании формулы (7) находим величину относительного изменения частоты вращения рабочего колеса

$$i = \frac{Q_m}{Q_H} = \frac{1600}{2000} = 0,8.$$

Согласно формулам пропорциональности, определим измененную скорость вращения рабочего колеса для обеспечения расчетного режима по подаче

$$n_{и} = i \cdot n_H = 0,8 \cdot 730 = 584 \text{ об/мин.}$$

Последовательность построения напорной характеристики насоса при измененной частоте вращения рабочего колеса следующая. На исходной напорной характеристике выбираются 7 точек в соответствии с параметрами, представленным в таблице 2. По значениям подачи и напора этих точек с помощью формул (7) и по величине относительного изменения частоты вращения рабочего колеса определяем подачу и напор напорной характеристики насоса с измененной частотой

$$Q_{и} = 0,8 \cdot Q_H ; \quad H_{и} = 0,8^2 \cdot H_H = 0,64 \cdot H_H,$$

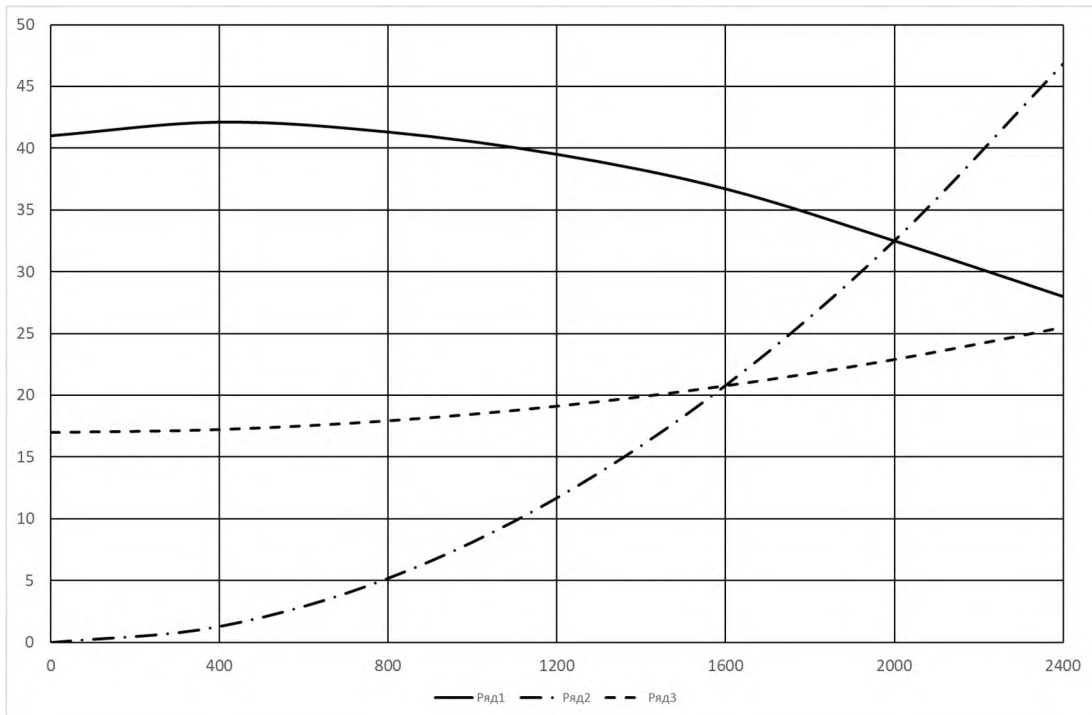


Рис. 6. Совместная напорная характеристика насоса Д2000-34, трубопровода и параболы подобных режимов

Результаты расчета характеристик насоса при измененной частоте вращения рабочего колеса, трубопровода и параболы подобных режимов приведем в табличной форме (таблица 3) и в графической форме на рис. 7, 8 и 9.

Характеристики насоса и трубопровода при измененной частоте вращения  
Таблица 3.

|                    |      |      |      |      |      |       |      |
|--------------------|------|------|------|------|------|-------|------|
| $Q_{инн}, м^3/час$ | 0    | 320  | 640  | 960  | 1280 | 1600  | 1920 |
| $H_{инн}, м$       | 41,0 | 27,0 | 26,4 | 25,3 | 23,5 | 20,8  | 17,9 |
| $H_{тп}, м$        | 17,0 | 17,2 | 17,6 | 18,4 | 19,4 | 20,89 | 22,5 |
| $H_{п}, м$         | 0    | 0,83 | 3,33 | 7,49 | 13,3 | 20,8  | 30,0 |
| $N_{и}, кВт$       | 26,6 | 30,9 | 35,3 | 39,4 | 43,1 | 46,4  | 49,8 |
| $\eta_{и}, \%$     | 0    | 30,5 | 57,5 | 76,4 | 87,1 | 86,7  | 83,9 |

По графикам на рис.7,8 и 9 определим, что в рабочей точке при измененной частоте вращения рабочего колеса  $n = 584 \text{ об/мин}$  подача  $Q_H = 1600 \text{ м}^3/час$ , напор  $H_H = 20,8 \text{ м}$ , мощность насоса составляет  $N_H = 46,4 \text{ кВт}$  и КПД -  $\eta = 86,7\%$



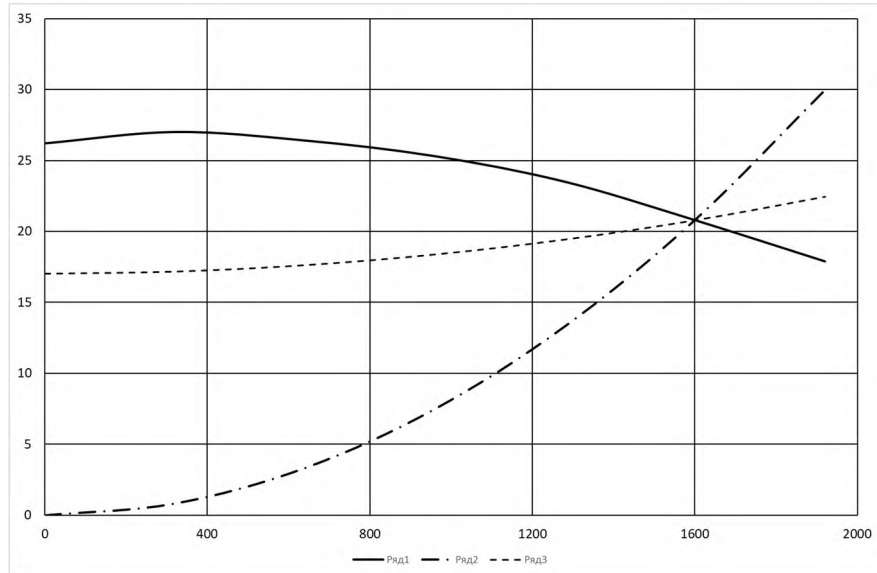


Рис. 7. Совместная напорная характеристика насоса Д2000-34 при измененной частоте вращения, трубопровода и параболы подобных режимов

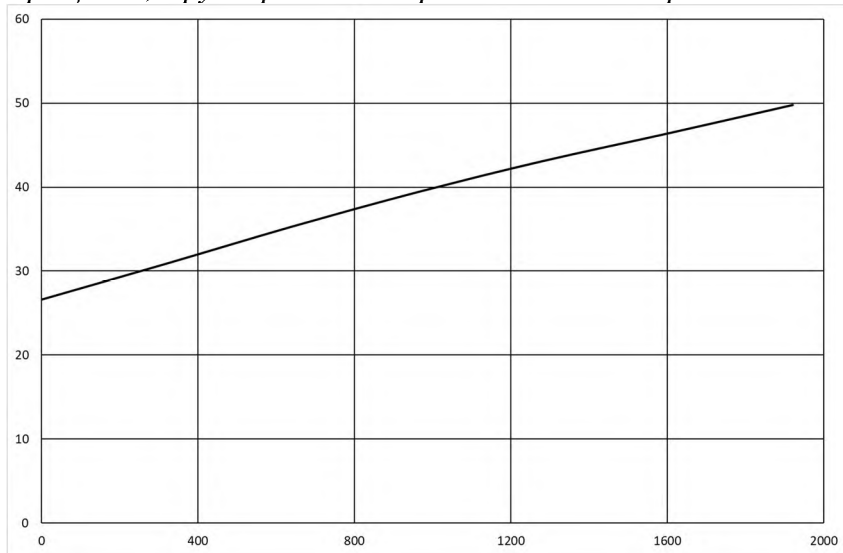


Рис. 8. Абсолютная энергетическая характеристика насоса Д2000-34 в кВт при измененной частоте вращения рабочего колеса

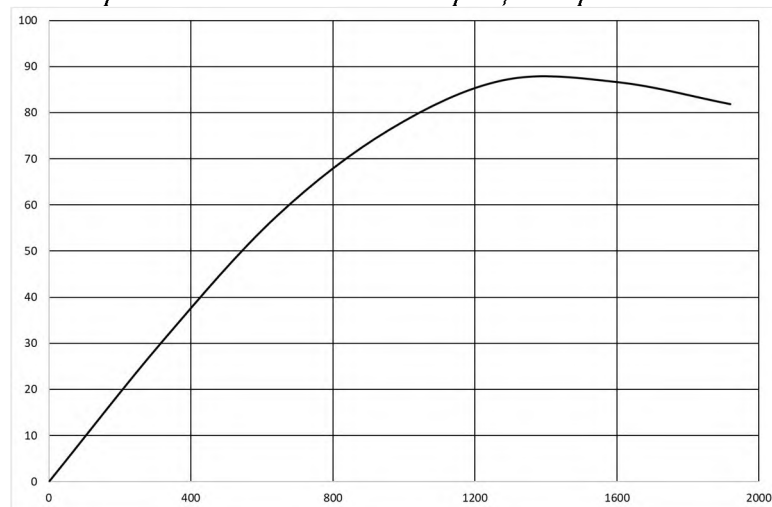


Рис. 9. Относительная энергетическая характеристика насоса Д2000-34 в % при измененной частоте вращения рабочего колеса

#### 4.1. Расчет потребляемой мощности насосной установки

Мощность, потребляемая насосным агрегатом при номинальной частоте вращения рабочего колеса:

$$N_{эл} = \frac{N_n}{\eta_{эл}},$$

где  $N_c$  - мощность насоса, кВт;  $\eta_{эл}$  - КПД электродвигателя определяем по каталогу (можно принять  $\eta_{эл} = 0,88...0,92$ ).

$$N_{эл} = \frac{99,2}{0,9} = 110,2 \text{ кВт}.$$

Мощность, потребляемая насосным агрегатом при измененной частоте вращения рабочего колеса:

$$N_{эл} = \frac{N_o}{\eta_{эл}},$$

где  $N_c$  - мощность насоса, кВт;  $\eta_{эл}$  - КПД электродвигателя определяем по каталогу (можно принять  $\eta_{эл} = 0,88...0,92$ ).

$$N_{эл} = \frac{46,4}{0,9} = 51,6 \text{ кВт}.$$

#### 4.6. Расчет показателей энергетической эффективности

Удельный расход электроэнергии (кВт/м<sup>3</sup>) насоса определяется по формуле

$$N_{уд} = \frac{N_{э}}{Q_{H(o)}}, \quad (10)$$

где  $N_{эл}$  - мощность потребляемая насосным агрегатом, кВт;  $Q_H$  - подача насоса при исходной частоте вращения, м<sup>3</sup>/час;  $Q_o$  - расчетная подача насоса при измененной частоте вращения, м<sup>3</sup>/час.

По условиям задачи получаем:

- удельный расход электроэнергии насосного агрегата при номинальной частоте вращения рабочего колеса

$$N_{уд} = \frac{110,2}{2530} = 0,044 \text{ кВт/м}^3;$$

- удельный расход электроэнергии насосного агрегата при измененной частоте вращения рабочего колеса

$$N_{уд} = \frac{51,6}{1600} = 0,032 \text{ кВт/м}^3;$$

Удельная стоимость подачи 1 м<sup>3</sup> при стоимости электроэнергии  $a = 5$  руб/кВт

- при исходной частоте вращения

$$Ц_{уд} = 0,044 \cdot 5 = 0,22 \text{ руб/м}^3;$$

- при измененной частоте вращения рабочего колеса

$$C_{удз} = 0,032 \cdot 5 = 0,16 \text{ руб/м}^3$$

## 2. Исходные данные индивидуальных заданий

Вариант индивидуального задания (таблица 3, практическая работа №8) содержит типоразмер центробежного насоса без обточки рабочего колеса, номинальную частоту вращения рабочего колеса (Приложение 1) и параметры характеристики трубопровода:  $H_T$  - геометрическая высота подъема воды трубопроводом, м;  $S$  - приведенный коэффициент сопротивления трубопровода,  $\text{м}/(\text{м}^3/\text{час})^2$ . Необходимо определить параметры совместной работы насоса и трубопровода при обеспечении в трубопроводе расчетной подачи  $Q_p$ ,  $\text{м}^3/\text{час}$  за изменения частоты вращения рабочего колеса.

### Оформление отчета о работе

Отчет должен содержать следующие разделы:

6. Тема работы. Цель работы.
7. Цель регулирования параметров при совместной работе насоса и трубопровода.
8. Виды и способы качественного регулирования, их преимущества и недостатки.
9. Порядок выполнения расчетов при качественном регулировании параметров совместной работы системы насос трубопровод изменением частоты вращения рабочего колеса.
10. Расчет по индивидуальному заданию, который должен содержать:
  - исходные данные по типоразмеру насоса и параметрам трубопровода;
  - характеристики насоса заданного типоразмера;
  - расчет напорно-расходной характеристики трубопровода;
  - построение графиков совместной работы трубопровода и насоса с номинальной частотой вращения рабочего колеса (рис.3, 4 и 5);
  - определение параметров рабочей точки трубопровода и насоса с номинальной частотой вращения рабочего колеса;
  - определение параметров параболы подобных режимов по заданным параметрам рабочей точки трубопровода (рис. 6);
  - определение коэффициента изменения частоты вращения рабочего колеса;
  - построение графиков совместной работы трубопровода и насоса с измененной частотой вращения рабочего колеса (рис. 7, 8 и 9);

- определение параметров совместной работы трубопровода с насосом с измененной частотой вращения рабочего колеса.
  - расчет потребляемой мощности и показателей энергетической эффективности насосной установки.
6. Выводы о выполнении цели работы.

**Вопросы для самостоятельной работы:**

6. Способы представления характеристик центробежных насосов в зависимости от изменения частоты вращения рабочего колеса.
7. Определение границ рабочего поля центробежного насоса по условию возможного возникновения кавитационных режимов в насосе и трубопроводах при изменении частоты вращения рабочего колеса.
8. Определение границ рабочего поля центробежного насоса по условию недопустимым снижением КПД.
9. Определение мощности, КПД центробежного насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса.

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГУЛИРОВАНИИ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ПО МАКСИМАЛЬНОМУ НАПОРУ В СЕТИ**

**Цель работы:** Практическое изучение качественного метода регулирования параметров совместной работы центробежного насоса и трубопровода за счет изменения частоты вращения рабочего колеса по максимальному напору в сети. Построить график совместной работы насоса и трубопровода при регулировании изменением частоты вращения рабочего колеса при таком способе регулирования. Парабола подобных режимов. Определение потребляемой мощности, КПД насосной установки при регулировании частоты вращения рабочего колеса. Ознакомиться с примером расчета. Выполнение работы по определению параметров регулирования совместной работы центробежный насос трубопровод при регулировании частоты вращения рабочего колеса по максимальному напору в сети по индивидуальному заданию.

### **1. Способы регулирования изменением частоты вращения рабочего колеса.**

Проблема повышения энергетической эффективности и надежности технологического процесса подачи и распределения воды, является одной из основных для систем водоснабжения (СВ). Современные СВ представляют собой сложный комплекс технологических процессов, инженерных сооружений, машин и аппаратов, которые содержат механическое, гидравлическое, энергетическое оборудование, трубопроводы, арматуру, контрольно-измерительные приборы и средства автоматизации.

Применение регулируемых электроприводов насосных агрегатов с ЦН на базе преобразователей частоты электрического тока дает возможность реализации различных способов изменения режимов работы систем насосный агрегат гидравлическая сеть путем плавного изменения частоты вращения рабочего колеса. Одним из главных преимуществ использования регулируемого электропривода насосных агрегатов является возможность адаптации его характеристик к характеристикам гидравлической сети СВ посредством выбора рациональной номинальной скорости вращения рабочего колеса, отвечающей требуемому режиму работы насосных агрегатов.

Анализ результатов применения в СВ регулируемого электропривода ЦН показывает, что в одних случаях его установка приводит к ощутимой экономии энергии, в других – она незначительна, в-третьих, установка такого привода не обеспечивает получение экономии энергии. Исследование методов и форм применения регулируемого привода свидетельствует о том, что на практике чаще всего используются технически наиболее простые, а экономически наименее эффективные способы управления насосными установками, такие, как стабилизация давления на максимальном допустимом уровне на выходе из ЦН.

Наиболее совершенным способом качественного регулирования параметров совместной работы центробежного насоса и трубопровода за счет изменения частоты вращения рабочего колеса является интегральный. По этому способу за основу применяется расчетная характеристика трубопровода для которой для каждого значения подачи соответствует определенное значение напора. Недостатком этого способа регулирования параметров совместной работы, является то, что за основу применяется некоторая расчетная напорно-расходная характеристика трубопровода

$$H_m = H_{\Gamma} + S \cdot Q^2$$

которая в условиях эксплуатации может существенно изменяться от реальных эксплуатационных параметров как по гидростатическому напору, так и по приведенным коэффициентам сопротивления трубопровода.

Поэтому наиболее применяемым способом частотного регулирования систем ЦН – гидравлическая сеть является изменения частоты вращения рабочего колеса с обеспечением постоянного максимально допустимого напора в водопроводной сети, как показано на рис.1.

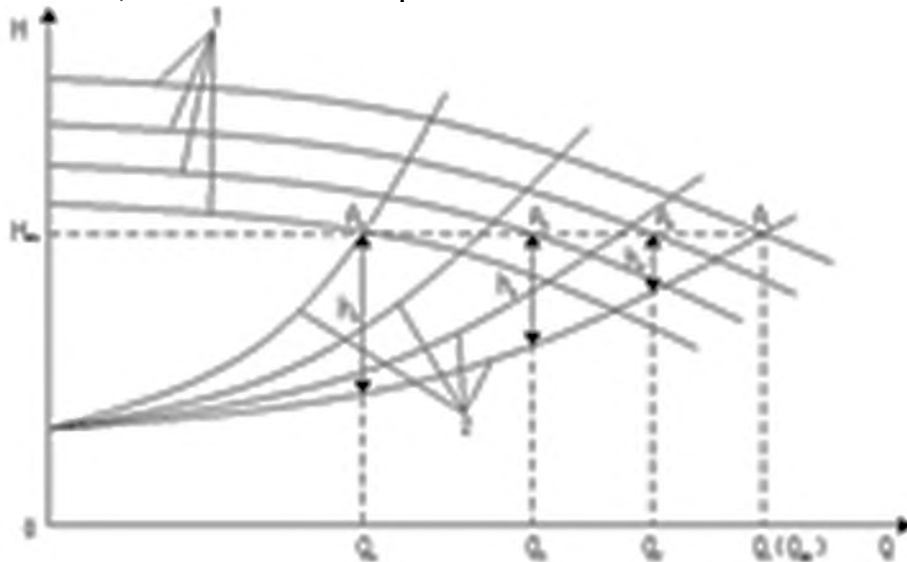


Рис.1. Работа системы ЦН гидравлическая сеть при стабилизации напора на максимальном уровне: 1 – напорные характеристики ЦН при различных частотах; 2 – характеристики трубопровода при различных режимах работы.

Такой режим регулирования, с ограничением максимально допустимого напора в сети, позволяет обеспечить необходимым напором потребителей и сократить потери воды, за счет снижения избыточных напоров при номинальной частоте вращения рабочего колеса. Недостатком данного способа является то, что при поддержании постоянного максимально допустимого напора в водопроводной сети, не учитываются потери, заложенные в динамическом напоре, который изменяется в зависимости от расхода.

При гидравлическом расчете водопроводной сети требуемый напор в сети рассчитывается при максимальном водопотреблении, с перспективой последующего развития расчетной зоны обслуживания НС. Это при снижении подачи насосных агрегатов вызывает превышение напоров на величину разности максимального и динамического напора в сети – на рис.1 величина  $h_i$ .

## 2. Определение параметров частотного регулирования по максимальному напору в сети

Для насоса заданного типоразмера по известной напорной характеристике  $H = f(Q)$  при номинальной частоте вращения рабочего колеса его напорная характеристики при изменении частоты вращения изменяется в соответствии с формулами пропорциональности. Напорные характеристики ЦН при изменении частоты вращения рабочего колеса расположены на параболах подобных режимов с вершиной в начале координат и описываются формулой

$$H = a \cdot Q^2.$$

где  $a$  - коэффициент параболы подобных режимов.

Так как режим регулирования обеспечивает поддержание постоянного напора в сети, то коэффициент параболы подобных режимов.

$$a = H_{max} / Q_P^2.$$

По известным коэффициентам  $a$  строятся параболы подобных режимов, которые пересекают напорную характеристику ЦН  $H = f(Q)$  при номинальной частоте вращения рабочего колеса при значении подачи  $Q_H$ . С учетом формулы пропорциональности определяем степень изменения частоты вращения рабочего колеса

$$i = \frac{Q_P}{Q_H},$$

где  $i = i_u / i_{nom}$ ,  $i_u$  – измененная частота вращения рабочего колеса,  $i_{nom}$  – номинальная частота вращения.

Применяя формулы пропорциональности, по исходным характеристикам ЦН при номинальной частоте вращения рабочего колеса по выбранным параметрам расчетного режима строят ряд характеристик для измененных частот вращения. Параметры ЦН при измененной частоте определяются для расчетной подачи.

### 3. Пример выполнения задания работы

**Задание.** Центробежный насос Д2000-34 с частотой вращения рабочего колеса  $n_H = 730$  об/мин работает совместно с трубопроводом с параметрами  $H_T = 17$  м - геометрическая высота подъема воды трубопроводом;  $S = 1,48 \cdot 10^{-6}$  м/(м<sup>3</sup>/час)<sup>2</sup> — приведенный коэффициент сопротивления трубопровода. Заданный расчетного расход в трубопроводе  $Q_p = 1600$  м<sup>3</sup>/час. Определить параметры совместной работы насоса и трубопровода, необходимую частоту вращения рабочего колеса для обеспечения расчетного расхода при обеспечении максимального напора в сети, пересчитать его напорную и энергетические характеристики.

### 4. Построение характеристик насоса с исходной частотой вращения и сети при их совместной работе

По заданному типоразмеру из каталога насосов находим графическое изображение характеристик насоса Д2000-34 с частотой вращения рабочего колеса  $n = 730$  об/мин. Характеристики насоса представляем в табличной форме для 8 точек напорной и энергетических характеристики насоса в рабочем интервале подач, которые представим в таблице 1, на рис. 2, 3 и 4.

Напорно-расходная характеристика трубопровода для подач в м<sup>3</sup>/час записывается в виде

$$H_m = H_T + S \cdot Q^2 = 17 + 1,48 \cdot Q^2 \cdot 10^{-6}. \quad (1)$$

Подставим в эту характеристику трубопровода 8 значений подач в диапазоне значений подач рабочего поля характеристик насоса. Результаты расчета характеристики трубопровода приведем в табличной форме (таблица 1) и графической форме на рис. 2.

Напорная характеристика насоса при номинальной частоте вращения и результаты расчета характеристики трубопровода

Таблица 1.

|                        |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q, м <sup>3</sup> /час | 0    | 400  | 800  | 1200 | 1600 | 2000 | 2400 | 2800 |
| $H_H, м$               | 41,0 | 42,1 | 41,3 | 39,5 | 36,7 | 32,5 | 28,0 | 23,5 |
| $H_m, м$               | 17,0 | 17,2 | 17,9 | 19,1 | 20,8 | 22,9 | 25,5 | 28,6 |
| $N, кВт$               | 52,0 | 60,3 | 68,9 | 76,9 | 84,2 | 90,7 | 97,3 | 103  |
| $\eta, \%$             | 0    | 33,5 | 59,4 | 77,4 | 87,6 | 88,5 | 84,6 | 78,1 |

Построим напорную характеристика насоса и нанесем на нее полученную характеристику трубопровода, как показано на рис. 2. Точка пересечения напорной характеристики насоса и характеристики трубопровода является



рабочей точкой устойчивой работы насосной установки с параметрами подача  $Q_H = 2530 \text{ м}^3/\text{час}$  и напор  $H_H = 26,5 \text{ м}$ . Следовательно, при совместной работе насоса при частоте вращения рабочего колеса  $n = 730 \text{ об/мин}$  и трубопровода подача насоса значительно больше, чем расчётная  $Q_p = 1600 \text{ м}^3/\text{час}$ . Для обеспечения расчётной подачи в трубопроводе выполним расчет напорной характеристики насоса при измененной частоте вращения рабочего колеса при обеспечении максимального напора в сети  $H_H = 26,5 \text{ м}$ .

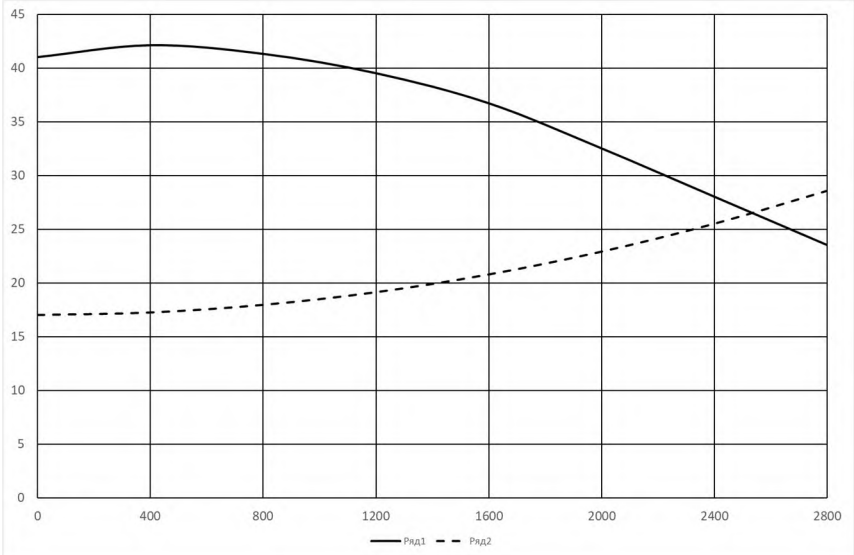


Рис. 2. Совместная напорная характеристика насоса Д2000-34 и трубопровода

По табличным данным таблицы 1 построим энергетические характеристики для мощности насоса (рис. 3) и его КПД (рис. 4) в зависимости от его подачи. По графику определим, что в рабочей точке при подаче  $Q_H = 2530 \text{ м}^3/\text{час}$  мощность насоса составляет  $N_H = 99,2 \text{ кВт}$  при частоте вращения рабочего колеса  $n = 730 \text{ об/мин}$ , и КПД -  $\eta = 82,7\%$ .

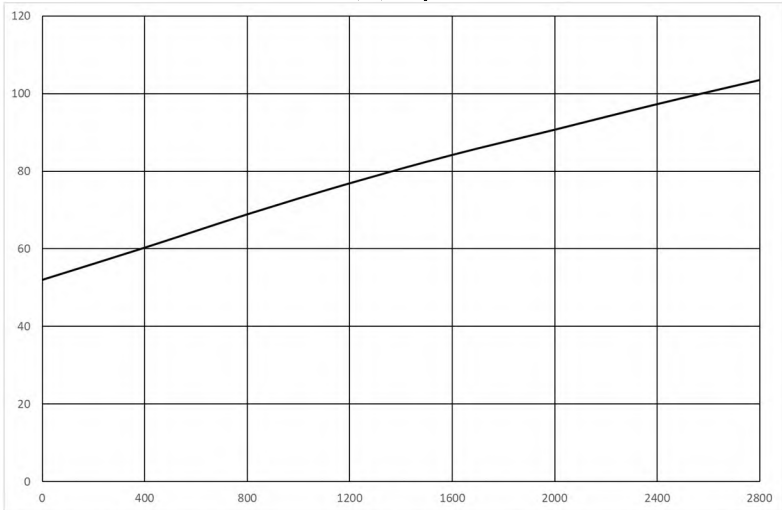


Рис. 3. Абсолютная энергетическая характеристика насоса Д2000-34 в кВт при измененной частоте вращения

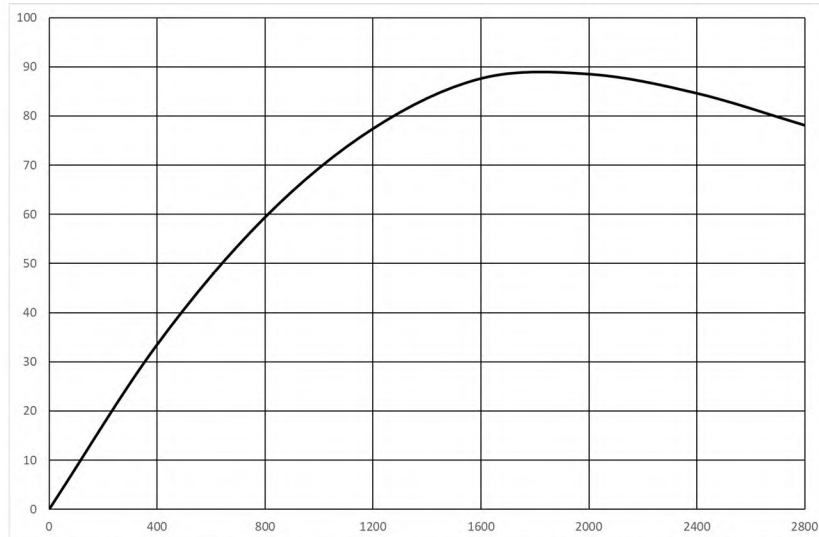


Рис. 4. Относительная энергетическая характеристика насоса Д2000-34 в %

#### 4. Построение характеристик насоса с измененной частотой вращения рабочего колеса и трубопровода при их совместной работе

Для определения степени изменения частоты вращения рабочего колеса определим параметры трубопровода с которыми должна работать насосная установка. По характеристике трубопровода (1) определим, что максимальный расчетный напор при совместной работе заданного насоса составляет  $H_{\text{н}} = 26,5$  м.

По значениям максимального напора в сети и расчетной подачи определим коэффициент параболы подобных режимов

$$a = \frac{26,5}{1600^2} = 10,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}/(\text{м}^2/\text{час})^2.$$

Парабола подобных режимов для данной задачи описывается зависимостью

$$H_{\text{п}} = 10,35 \cdot Q^2 \cdot 10^{-6}, \text{ м.}$$

Задаваясь значениями  $Q$  для заданного диапазона подач, который рассматривался в таблице 1, определяем значения напоров параболы подобных режимов  $H_{\text{п}}$ , которые представим в таблице 2 и по полученным точкам строим параболу подобных режимов на рис. 6.

Парабола подобных режимов совместно с напорной характеристикой насоса и характеристикой трубопровода

Таблица 2.

| $Q, \text{ м}^3/\text{час}$ | 0    | 400  | 800  | 1200 | <b>1600</b> | 2000 | 2400 | 2800 |
|-----------------------------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|
| $H_{\text{п}}, \text{ м}$   | 41,0 | 42,1 | 41,3 | 39,5 | <b>36,7</b> | 32,5 | 28,0 | 23,5 |
| $H_{\text{р}}, \text{ м}$   | 26,5 | 26,5 | 26,5 | 26,5 | <b>26,5</b> | 26,5 | 26,5 | 26,5 |
| $H_{\text{н}}, \text{ м}$   | 0    | 1,66 | 6,62 | 14,9 | <b>26,5</b> | 41,4 | 59,6 | 81,1 |

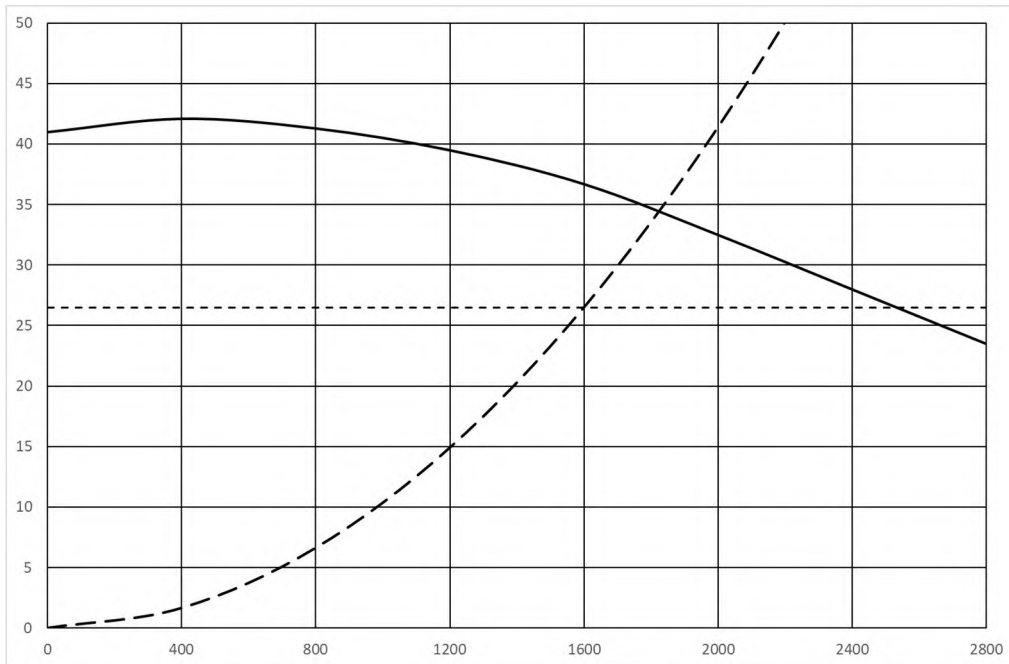


Рис. 5. Напорная характеристика насоса Д2000-34, параболы подобных режимов при максимальном напоре в сети

Парабола подобных режимов пересекает напорную характеристику насоса в точке с параметрами: подача  $Q_H = 1825 \text{ м}^3/\text{час}$  и напор  $H_H = 34,4 \text{ м}$ , а прямую максимальных напоров в точке с параметрами: подача  $Q_m = 1600 \text{ м}^3/\text{час}$  и напор  $H_m = 26,5 \text{ м}$ . Величина относительного изменения частоты вращения рабочего колеса

$$i = \frac{Q_m}{Q_H} = \frac{1600}{1825} = 0,877.$$

Согласно формулам пропорциональности, определим измененную скорость вращения рабочего колеса для обеспечения расчетного режима по подаче

$$n_{и} = i \cdot n_H = 0,877 \cdot 730 = 640 \text{ об/мин.}$$

Последовательность построения напорной характеристики насоса при измененной частоте вращения рабочего колеса следующая. На исходной напорной характеристике выбираются 7 точек в соответствии с параметрами, представленным в таблице 1. По значениям подачи и напора этих точек с помощью формул пропорциональности и по величине относительного изменения частоты вращения рабочего колеса определяем подачу и напор напорной характеристики насоса с измененной частотой

$$Q_{и} = 0,877 \cdot Q_H; \quad H_{и} = 0,877^2 \cdot H_H = 0,769 \cdot H_H, \quad N_{и} = 0,877^3 \cdot N_H = 0,675 \cdot N_H$$

Характеристика трубопровода при регулировании частоты вращения по максимальному напору также измениться, так как при любом расходе в сети обеспечивается напор  $H_m = 26,5$  м. Приведенный коэффициент сопротивления при изменении частоты вращения определим по выражению:

$$S_u = \frac{H_m - H_\Gamma}{Q_p^2}.$$

По условию задачи определим приведенный коэффициент сопротивления трубопровода при измененной частоте вращения рабочего колеса

$$S_u = \frac{26,5 - 17}{1600^2} = 3,71 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}}{\text{м}^6/\text{час}^2}$$

В результате напорно-расходная характеристика трубопровода при измененной частоте вращения рабочего колеса записывается в виде

$$H_{m_u} = H_\Gamma + S \cdot Q^2 = 17 + 3,71 \cdot Q^2 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$$

Подставим в характеристику трубопровода 7...8 значений подач в диапазоне напорной характеристики насоса. Результаты расчета характеристик насоса, параболы подобных режимов и характеристики трубопровода при измененной частоте вращения рабочего колеса приведем в табличной форме в таблице 3. По табличным данным таблицы 3 на рис.6 показаны полученные в результате расчета напорная характеристика насоса, параболы подобных режимов и трубопровода при измененной частоте вращения рабочего колеса  $n_u = 640$  об/мин. На рис.7 показана полученная в результате расчета абсолютная энергетическая характеристика насоса в кВт при измененной частоте вращения рабочего колеса, а на рис.8 относительная энергетическая характеристика КПД в %.

Характеристики насоса и трубопровода при измененной частоте вращения  
Таблица 3.

|                                 |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $Q_{ин}, \text{м}^3/\text{час}$ | 0    | 351  | 702  | 1052 | 1403 | 1754 | 2105 |
| $H_{ин}, \text{м}$              | 31,5 | 32,4 | 31,8 | 30,4 | 28,2 | 24,9 | 21,5 |
| $H_m, \text{м}$                 | 17,0 | 17,5 | 18,8 | 21,1 | 24,3 | 28,4 | 33,4 |
| $H_n, \text{м}$                 | 0    | 1,27 | 5,09 | 11,5 | 20,4 | 31,8 | 45,9 |
| $N_u, \text{кВт}$               | 35,1 | 40,7 | 46,5 | 51,9 | 56,8 | 61,2 | 65,7 |
| $\eta_u, \%$                    | 0    | 31,7 | 58,3 | 76,8 | 87,3 | 88,2 | 84,2 |

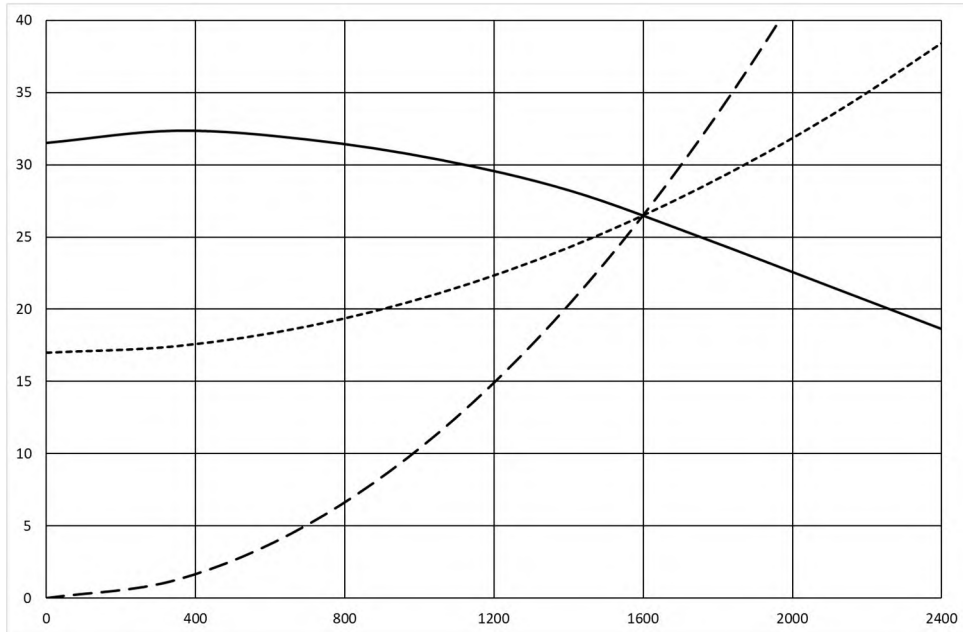


Рис. 6. Совместная напорная характеристика насоса Д2000-34 при измененной частоте вращения, трубопровода и параболы подобных режимов

По графикам совместной работы ЦН и трубопровода определим, что в рабочей точке при измененной частоте вращения рабочего колеса  $n_{и} = 640$  об/мин: подача  $Q_H = 1600$  м<sup>3</sup>/час, напор  $H_m = 26,5$  м, мощность насоса составляет  $N_H = 59,4$  кВт и КПД -  $\eta = 88,3\%$ .

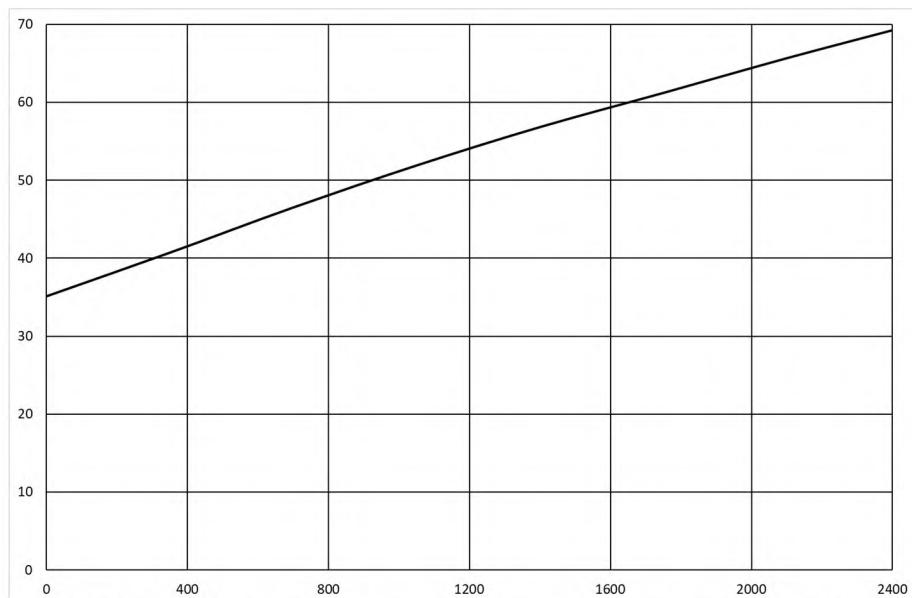


Рис. 7. Абсолютная энергетическая характеристика насоса Д2000-34 в кВт при измененной частоте вращения рабочего колеса

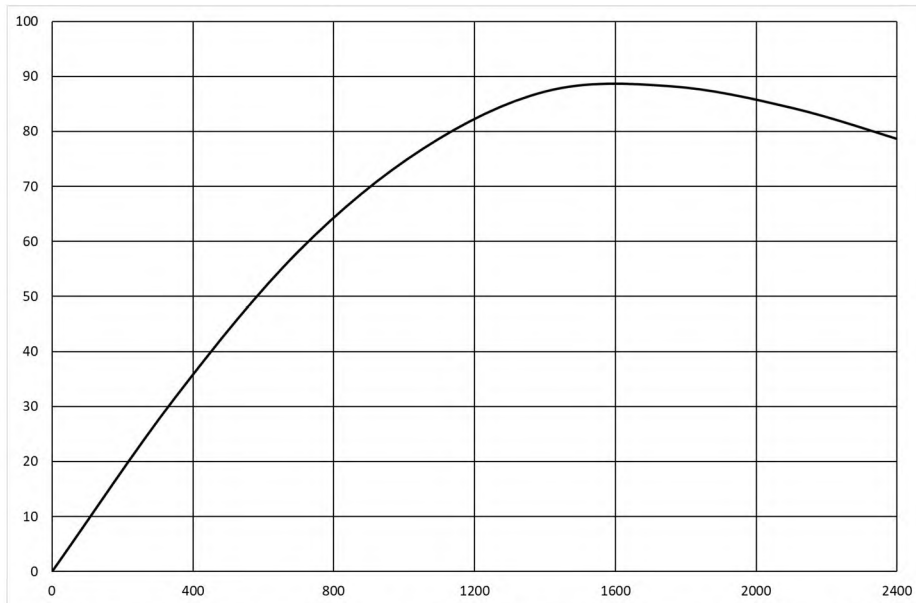


Рис. 8. Относительная энергетическая характеристика насоса Д2000-34 в % при измененной частоте вращения рабочего колеса

#### 4.1. Расчет потребляемой мощности насосной установки

Мощность, потребляемая насосным агрегатом при номинальной частоте вращения рабочего колеса:

$$N_{эл} = \frac{N_n}{\eta_{эл}},$$

где  $N_c$  - мощность насоса, кВт;  $\eta_{эл}$  - КПД электродвигателя определяем по каталогу (можно принять  $\eta_{эл} = 0,88...0,92$ ).

$$N_{эл} = \frac{99,2}{0,9} = 110,2 \text{ кВт}.$$

Мощность, потребляемая насосным агрегатом при измененной частоте вращения рабочего колеса:

$$N_{эл} = \frac{N_n}{\eta_{эл}},$$

где  $N_c$  - мощность насоса, кВт;  $\eta_{эл}$  - КПД электродвигателя определяем по каталогу (можно принять  $\eta_{эл} = 0,88...0,92$ ).

$$N_{эл} = \frac{59,4}{0,9} = 66,0 \text{ кВт}.$$

#### 4.7. Расчет показателей энергетической эффективности

Удельный расход электроэнергии (кВт/м<sup>3</sup>) насоса определяется по формуле

$$N_{уд} = \frac{N_э}{Q_{H(u)}},$$

где  $N_{эл}$  - мощность потребляемая насосным агрегатом, кВт;  $Q_n$  – подача насоса при исходной частоте вращения, м<sup>3</sup>/час;  $Q_o$  – расчетная подача насоса при измененной частоте вращения, м<sup>3</sup>/час.

**По рассмотренным условиям задачи определяем:**

- удельный расход электроэнергии насосного агрегата при номинальной частоте вращения рабочего колеса

$$N_{y\partial} = \frac{110,2}{2530} = 0,044 \text{ кВт/м}^3 ;$$

- удельный расход электроэнергии насосного агрегата при измененной частоте вращения рабочего колеса

$$N_{y\partial} = \frac{66,0}{1600} = 0,041 \text{ кВт/м}^3 ;$$

Удельная стоимость подачи 1 м<sup>3</sup> при стоимости электроэнергии  $a = 5$  руб/кВт  
- при исходной частоте вращения

$$Ц_{y\partial} = 0,044 \cdot 5 = 0,22 \text{ руб/м}^3 ;$$

- при измененной частоте вращения рабочего колеса

$$Ц_{y\partial} = 0,041 \cdot 5 = 0,205 \text{ руб/м}^3$$

## 5. Исходные данные индивидуальных заданий

Вариант индивидуального задания (таблица 3, практическая работа №8) содержит типоразмер центробежного насоса без обточки рабочего колеса, номинальную частоту вращения рабочего колеса (Приложение 1) и параметры характеристики трубопровода:  $H_r$  - геометрическая высота подъема воды трубопроводом, м;  $S$  - приведенный коэффициент сопротивления трубопровода, м/(м<sup>3</sup>/час)<sup>2</sup>. Необходимо определить параметры совместной работы насоса и трубопровода при обеспечении в трубопроводе расчетной подачи  $Q_p$ , м<sup>3</sup>/час за изменения частоты вращения рабочего колеса.

### Оформление отчета о практической работе

Отчет должен содержать следующие разделы:

**5.1.** Тема работы. Цель работы.

**5.2.** Способы регулирования изменением частоты вращения рабочего колеса.

**5.3.** Порядок выполнения расчетов при качественном регулировании параметров совместной работы системы насос трубопровод изменением частоты вращения рабочего колеса по максимальному напору в сети.

**5.3.1.** Расчет по индивидуальному заданию, который должен содержать:

- исходные данные по типоразмеру насоса и параметрам трубопровода;
- характеристики насоса заданного типоразмера;
- расчет напорно-расходной характеристики трубопровода;
- построение графиков совместной работы трубопровода и насоса с номинальной частотой вращения рабочего колеса (рис. 2, 3 и 4);
- определение параметров рабочей точки трубопровода и насоса с номинальной частотой вращения рабочего колеса;
- определение параметров параболы подобных режимов по заданным параметрам рабочей точки трубопровода (рис. 5);
- определение коэффициента изменения частоты вращения рабочего колеса;
- построение графиков совместной работы трубопровода и насоса с измененной частотой вращения рабочего колеса (рис. 6, 7 и 8);
- определение параметров совместной работы трубопровода с насосом с измененной частотой вращения рабочего колеса;
- расчет потребляемой мощности и показателей энергетической эффективности насосной установки.

**5.4.** Выводы о выполнении цели работы.

#### **Вопросы для самостоятельной работы:**

1. Способы представления характеристик центробежных насосов в зависимости от изменения частоты вращения рабочего колеса.
2. Определение границ рабочего поля центробежного насоса по условию возможного возникновения кавитационных режимов в насосе и трубопроводах при изменении частоты вращения рабочего колеса.
3. Определение границ рабочего поля центробежного насоса по условию недопустимым снижением КПД.
4. Определение мощности, КПД центробежного насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса по максимальному напору в сети.



## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ ЛИНЕЙНО-ИНТЕГРАЛЬНОМ СПОСОБЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА**

**Цель работы:** Практическое изучение качественного метода регулирования параметров совместной работы центробежного насоса и трубопровода за счет линейно-интегрального способа изменения частоты вращения рабочего колеса. Построить график совместной работы насоса и трубопровода при регулировании изменением частоты вращения рабочего колеса при таком способе регулирования. Парабола подобных режимов. Определение потребляемой мощности, КПД насосной установки при регулировании частоты вращения рабочего колеса при линейно-интегральном способе регулирования. Ознакомиться с примером расчета. Выполнение работы по определению параметров регулирования совместной работы центробежный насос трубопровод при линейно-интегральном способе регулировании частоты вращения рабочего колеса по индивидуальному заданию.

### **1. Повышение энергетической эффективности качественных способов регулирования параметров совместной работы центробежного насоса и трубопровода**

Применение регулируемых электроприводов насосных агрегатов с ЦН на базе преобразователей частоты электрического тока дает возможность реализации различных способов качественного регулирования режимов работы систем насосный агрегат гидравлическая сеть путем плавного изменения частоты вращения рабочего колеса. Одним из главных преимуществ использования регулируемого электропривода насосных агрегатов является возможность адаптации его характеристик к характеристикам гидравлической сети СВ посредством выбора рациональной номинальной скорости вращения рабочего колеса, отвечающей требуемому режиму работы насосных агрегатов.

Наиболее совершенным способом качественного регулирования параметров совместной работы центробежного насоса и трубопровода за счет изменения частоты вращения рабочего колеса является интегральный. По этому способу за основу применяется расчетная характеристика трубопровода по которой для каждого значения подачи соответствует определенное значение напора. Недостатком этого способа регулирования параметров совместной работы, является то, что за основу применяется некоторая расчетная напорно-расходная характеристика трубопровода. В условиях эксплуатации действительная характеристика трубопровода изменяться случайным образом, поэтому эксплуатационные параметры совместной работы существенно могут

отличаться как по гидростатическому напору, так и по приведенным коэффициентам сопротивления трубопровода. Кроме этого, для нахождения расчетной характеристики трубопровода требуется статистическая обработка параметров совместной работы в течении определенного времени.

Наиболее применяемым способом частотного регулирования режимов совместной работы систем ЦН – гидравлическая сеть является изменения частоты вращения рабочего колеса с обеспечением постоянного максимально допустимого напора в водопроводной сети. Режим регулирования, с ограничением максимально допустимого напора в сети, позволяет обеспечить необходимым напором потребителей и сократить потери воды, за счет снижения избыточных напоров. Но при поддержании постоянного максимально допустимого напора в водопроводной сети, не учитываются потери, заложенные в динамическом напоре, который изменяется в зависимости от расхода. При таком способе регулирования снижение подачи насосных агрегатов вызывает превышение напоров на величину разности максимального и динамического напора в сети. При гидравлическом расчете водопроводной сети требуемый напор в сети рассчитывается при максимальном водопотреблении, с перспективой последующего развития расчетной зоны обслуживания НС. Однако напоры в распределительной сети могут изменяться в значительных пределах. В ночные часы, при минимальном водопотреблении, напоры могут достигать максимальных значений, а в периоды максимального водопотребления, напоры будут минимальными. Поэтому применение частотного регулирования по максимальному напору создает условия нерационального водоснабжения и перерасхода электроэнергии.

## 2. Определение параметров линейно-интегрального способа частотного регулирования

Для упрощения применения интегрального способа регулирования частоты вращения рабочего колеса применяется линейно-интегральный способ, согласно которому напор на выходе насосного агрегата регулируется пропорционально подаче в диапазоне напоров от минимального до максимального. То есть регулирование выполняется по линейной характеристике

$$H_H = H_\Gamma + Q \cdot \frac{H_m - H_\Gamma}{Q_m}, \quad (1)$$

где  $H_\Gamma$  – геодезический напор,  $H_m$  – максимальный напор при максимальном расходе в сети  $Q_m$ .

Для насоса заданного типоразмера по известной напорной характеристике  $H = f(Q)$  при номинальной частоте вращения рабочего колеса его напорная характеристика при изменении частоты вращения изменяется в соответствии с формулами пропорциональности. Напорные характеристики ЦН при изменении частоты вращения рабочего колеса расположены на параболах подобных режимов с вершиной в начале координат и описываются формулой

$$H = a \cdot Q^2.$$

где  $a$  - коэффициент параболы подобных режимов.

Режим регулирования обеспечивает поддержание расчетного напора в сети по характеристике (1), то есть расчетный напор при расчетной подаче  $Q_P$  определяется по зависимости

$$H_P = H_\Gamma + Q_P \cdot \frac{H_m - H_\Gamma}{Q_m}.$$

По расчетному напору определяется коэффициент параболы подобных режимов.

$$a = H_P / Q_P^2.$$

По известным коэффициентам  $a$  строятся параболы подобных режимов, которые пересекают напорную характеристику ЦН  $H = f(Q)$  при номинальной частоте вращения рабочего колеса при значении подачи  $Q_H$ . С учетом формулы пропорциональности определяется степень изменения частоты вращения рабочего колеса

$$i = \frac{Q_P}{Q_H},$$

где  $i = i_u / i_{nom}$ ,  $i_u$  – измененная частота вращения рабочего колеса,  $i_{nom}$  – номинальная частота вращения.

Применяя формулы пропорциональности, по исходным характеристикам ЦН при номинальной частоте вращения рабочего колеса по выбранным параметрам расчетного режима строят ряд характеристик для измененных частот вращения. Параметры ЦН при измененной частоте определяются для расчетной подачи.

## 2. Пример выполнения задания работы

**Задание.** Центробежный насос Д2000-34 с частотой вращения рабочего колеса  $n_H = 730$  об/мин работает совместно с трубопроводом с параметрами  $H_T = 17$  м - геометрическая высота подъема воды трубопроводом;  $S = 1,48 \cdot 10^{-6}$  м/(м<sup>3</sup>/час)<sup>2</sup> — приведенные коэффициенты сопротивления трубопровода. Заданный расчетный расход в трубопроводе  $Q_p = 1600$  м<sup>3</sup>/час. Определить параметры совместной работы насоса и трубопровода, необходимую частоту вращения рабочего колеса для обеспечения расчетного расхода и пересчитать его напорную и энергетическую характеристику.

## 3. Построение характеристик насоса с исходной частотой вращения и сети при их совместной работе

По заданному типоразмеру из каталога насосов находим графическое изображение характеристик насоса Д2000-34 с частотой вращения рабочего колеса  $n = 730$  об/мин. Характеристики насоса представим в табличной форме для 8 точек напорной и энергетических характеристики насоса в рабочем интервале подач, которые представим в таблице 1, на рис. 2, 3 и 4.

Напорно-расходная характеристика трубопровода для подач в м<sup>3</sup>/час записывается в виде

$$H_m = H_T + S \cdot Q^2 = 17 + 1,48 \cdot Q^2 \cdot 10^{-6}. \quad (1)$$

Подставим в эту характеристику трубопровода 8 значений подач в диапазоне значений подач рабочего поля характеристик насоса. Результаты расчета характеристики трубопровода приведем в табличной форме (таблица 1) и графической форме на рис. 1.

Подставим в эту характеристику трубопровода 8 значений подач в диапазоне значений подач рабочего поля характеристик насоса. Результаты расчета характеристики трубопровода приведем в табличной форме (таблица 1) и графической форме на рис. 1.

Напорная характеристика насоса при номинальной частоте вращения и результаты расчета характеристики трубопровода

Таблица 1.

|                        |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q, м <sup>3</sup> /час | 0    | 400  | 800  | 1200 | 1600 | 2000 | 2400 | 2800 |
| $H_H, м$               | 41,0 | 42,1 | 41,3 | 39,5 | 36,7 | 32,5 | 28,0 | 23,5 |
| $H_m, м$               | 17,0 | 17,2 | 17,9 | 19,1 | 20,8 | 22,9 | 25,5 | 28,6 |
| $N, кВт$               | 52,0 | 60,3 | 68,9 | 76,9 | 84,2 | 90,7 | 97,3 | 103  |
| $\eta, \%$             | 0    | 33,5 | 59,4 | 77,4 | 87,6 | 88,5 | 84,6 | 78,1 |

Построим напорную характеристика насоса и нанесем на нее полученную характеристику трубопровода, как показано на рис. 1. Точка пересечения напорной характеристики насоса и характеристики трубопровода является рабочей точкой устойчивой работы насосной установки с параметрами максимальная подача  $Q_m = 2530$  м<sup>3</sup>/час и напор при этой подаче  $H_m = 26,5$  м.

Следовательно, при совместной работе насоса при частоте вращения рабочего колеса  $n = 730$  об/мин и трубопровода подача насоса значительно больше, чем расчётная  $Q_p = 1600$  м<sup>3</sup>/час. Для обеспечения расчётной подачи в трубопроводе выполним расчет напорной характеристики насоса при измененной частоте вращения рабочего колеса при линейно интегральном способе регулирования.

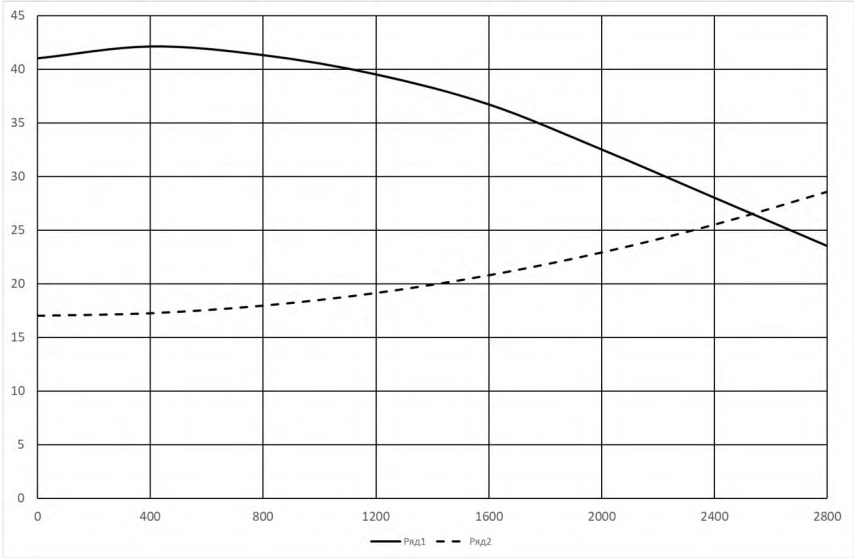


Рис. 1. Совместная напорная характеристика насоса Д2000-34 и трубопровода

По табличным данным таблицы 1 построим энергетические характеристики для мощности насоса (рис. 2) и его КПД (рис. ) в зависимости от его подачи. По графику определим, что в рабочей точке при подаче  $Q_H = 2530$  м<sup>3</sup>/час мощность насоса составляет  $N_H = 99,2$  кВт при частоте вращения рабочего колеса  $n = 730$  об/мин, и КПД -  $\eta = 82,7\%$ .

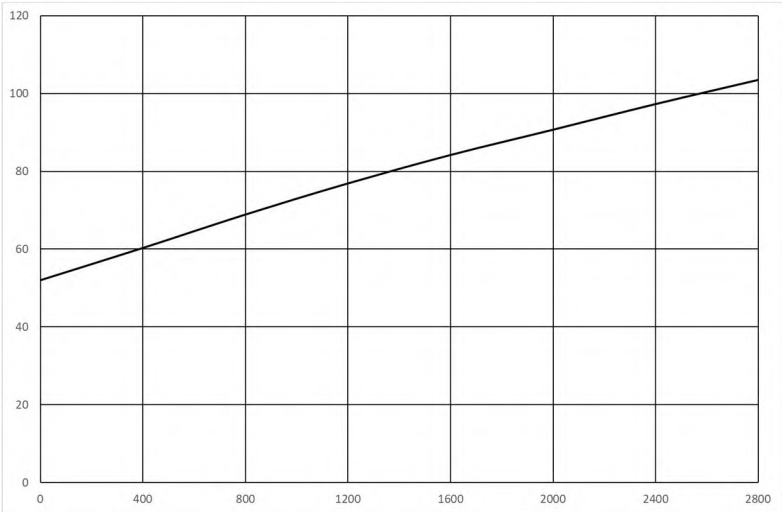


Рис. 2. Абсолютная энергетическая характеристика насоса Д2000-34 в кВт при измененной частоте вращения

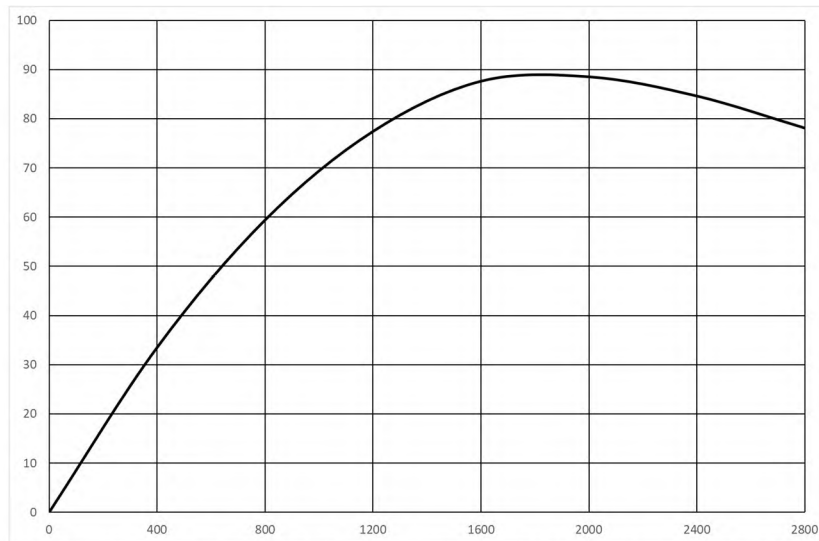


Рис. 3. Относительная энергетическая характеристика насоса Д2000-34 в %

#### 4. Построение характеристик насоса с измененной частотой вращения рабочего колеса и трубопровода при их совместной работе

Для линейно-интегрального способа регулирования частоты вращения рабочего колеса напор на выходе насосного агрегата, согласно (1), регулируется пропорционально подаче в диапазоне напоров от минимального до максимального по линейной характеристике

$$H_H = H_r + Q \cdot \frac{H_m - H_r}{Q_m} = 17 + Q \cdot \frac{26,5 - 17}{2530} = 17 + Q \cdot 3,75 \cdot 10^{-3}, \text{ м}$$

где  $H_r$  – геодезический напор,  $H_m$  – максимальный напор при максимальном расходе в сети  $Q_m$ .

Подставим в эту регулировочную характеристику трубопровода 8 значений подач в диапазоне значений подач рабочего поля характеристик насоса. Результаты расчета характеристики трубопровода приведем в табличной форме (таблица 2) и графической форме на рис. 4.

Для определения степени изменения частоты вращения рабочего колеса определим параметры регулировочной характеристики, с которыми должна работать насосная установка при линейно-интегральном способе регулирования. По регулировочной характеристике определим, что при расчетном расходе в трубопроводе  $Q_p = 1600 \text{ м}^3/\text{час}$  расчетный напор должен составлять

$$H_H = 17 + 1600 \cdot 3,75 \cdot 10^{-3} = 23 \text{ м.}$$

По значениям расчетного расхода и напора определим коэффициент параболы подобных режимов по формуле

$$a = \frac{23}{1600^2} = 8,98 \cdot 10^{-6} \text{ м}/(\text{м}^2/\text{час})^2.$$

Парабола подобных режимов при линейно-интегральном способе регулирования для данной задачи описывается зависимостью

$$H_{\Pi} = 8,98 \cdot Q^2 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$$

Задаваясь значениями  $Q$  в заданном диапазоне подач, который рассматривался в таблице 1, определяем значения напоров параболы подобных режимов  $H_{\Pi}$ , при линейно-интегральном способе регулирования, которые представим в таблице 2 и по полученным точкам строим параболу подобных режимов на рис. 4.

Парабола подобных режимов совместно с напорной характеристикой насоса и характеристикой трубопровода

Таблица 2.

| $Q, \text{ м}^3/\text{час}$ | 0    | 400  | 800  | 1200 | <b>1600</b> | 2000 | 2400 | 2800 |
|-----------------------------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|
| $H_{\Pi}, \text{ м}$        | 41,0 | 42,1 | 41,3 | 39,5 | <b>36,7</b> | 32,5 | 28,0 | 23,5 |
| $H_m, \text{ м}$            | 17,0 | 17,2 | 17,9 | 19,1 | <b>20,8</b> | 22,9 | 25,5 | 28,6 |
| $H_p, \text{ м}$            | 17   | 18,5 | 20   | 21,5 | <b>23,0</b> | 24,5 | 26,0 | 27,5 |
| $H_n, \text{ м}$            | 0    | 1,44 | 5,75 | 12,9 | <b>23,0</b> | 35,9 | 51,7 | 70,4 |

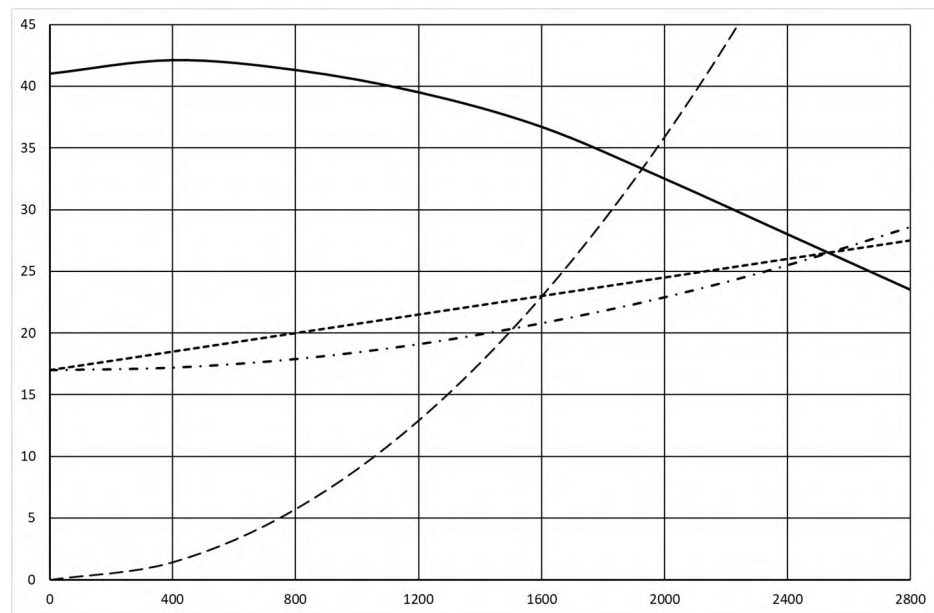


Рис. 5. Напорная характеристика насоса Д2000-34, напорно-расходная характеристика сети, регулировочная характеристика, парабола подобных режимов при линейно-интегральном способе регулирования

Парабола подобных режимов пересекает напорную характеристику насоса в точке с параметрами: подача  $Q_H = 1925 \text{ м}^3/\text{час}$  и напор  $H_H = 33,25 \text{ м}$ , а характеристику регулирования при линейно-интегральном способе в точке с параметрами: подача  $Q_m = 1600 \text{ м}^3/\text{час}$  и напор  $H_p = 23 \text{ м}$ .

Величина относительного изменения частоты вращения рабочего колеса

$$i = \frac{Q_m}{Q_H} = \frac{1600}{1925} = 0,831.$$

Согласно формулам пропорциональности, определим измененную скорость вращения рабочего колеса для обеспечения расчетного режима по подаче

$$n_u = i \cdot n_H = 0,831 \cdot 730 = 607 \text{ об/мин.}$$

Последовательность построения напорной характеристики насоса при измененной частоте вращения рабочего колеса следующая. На исходной напорной характеристике выбираются 7 точек в соответствии с параметрами, представленным в таблице 1. По значениям подачи и напора этих точек с помощью формул пропорциональности и по величине относительного изменения частоты вращения рабочего колеса определяем подачу и напор напорной характеристики насоса с измененной частотой по формулам

$$Q_u = 0,831 \cdot Q_H; H_u = 0,831^2 \cdot H_H = 0,691 \cdot H_H, N_u = 0,831^3 \cdot N_H = 0,574 \cdot N_H.$$

Характеристика трубопровода при линейно-интегральном способе регулирования измениться, так как напор на выходе насосного агрегата регулируется пропорционально подаче в диапазоне напоров от минимального до максимального по зависимости (1). Приведенный коэффициент сопротивления при изменении частоты вращения определим по выражению:

$$S_u = \frac{H_p - H_\Gamma}{Q_p^2}.$$

По условию задачи определим приведенный коэффициент сопротивления трубопровода при измененной частоте вращения рабочего колеса

$$S_u = \frac{23 - 17}{1600^2} = 2,34 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}}{\text{м}^6/\text{час}^2}$$

В результате напорно-расходная характеристика трубопровода при измененной частоте вращения рабочего колеса при линейно-интегральном регулировании записывается в виде

$$H_{m_u} = H_\Gamma + S \cdot Q^2 = 17 + 2,34 \cdot Q^2 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$$

Подставим в характеристику трубопровода 7...8 значений подач в диапазоне напорной характеристики насоса. Результаты расчета характеристик насоса, параболы подобных режимов и характеристики трубопровода при измененной частоте вращения рабочего колеса приведем в табличной форме в таблице 3.



По данным таблицы 3 на рис.6 показаны полученные в результате расчета напорная характеристика насоса, параболы подобных режимов и трубопровода при измененной частоте вращения рабочего колеса  $n_{и} = 607$  об/мин. На рис.7 показана полученная в результате расчета абсолютная энергетическая характеристика насоса в кВт при измененной частоте вращения рабочего колеса, а на рис.8 относительная энергетическая характеристика КПД в %.

Характеристики насоса и трубопровода при измененной частоте вращения  
Таблица 3.

|                   |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $Q_{ин}, м^3/час$ | 0    | 332  | 665  | 997  | 1330 | 1662 | 1994 |
| $H_{ин}, м$       | 28,3 | 29,1 | 28,5 | 27,3 | 25,4 | 22,5 | 19,3 |
| $H_{тп}, м$       | 17,0 | 17,2 | 18,0 | 19,3 | 21,1 | 23,5 | 26,3 |
| $H_{п}, м$        | 0    | 0,99 | 3,97 | 8,93 | 15,9 | 24,8 | 35,7 |
| $N_{и}, кВт$      | 29,8 | 34,6 | 39,5 | 44,1 | 48,3 | 52,1 | 55,6 |
| $\eta_{и}, \%$    | 0    | 31,0 | 57,9 | 76,6 | 87,1 | 85,6 | 84,0 |

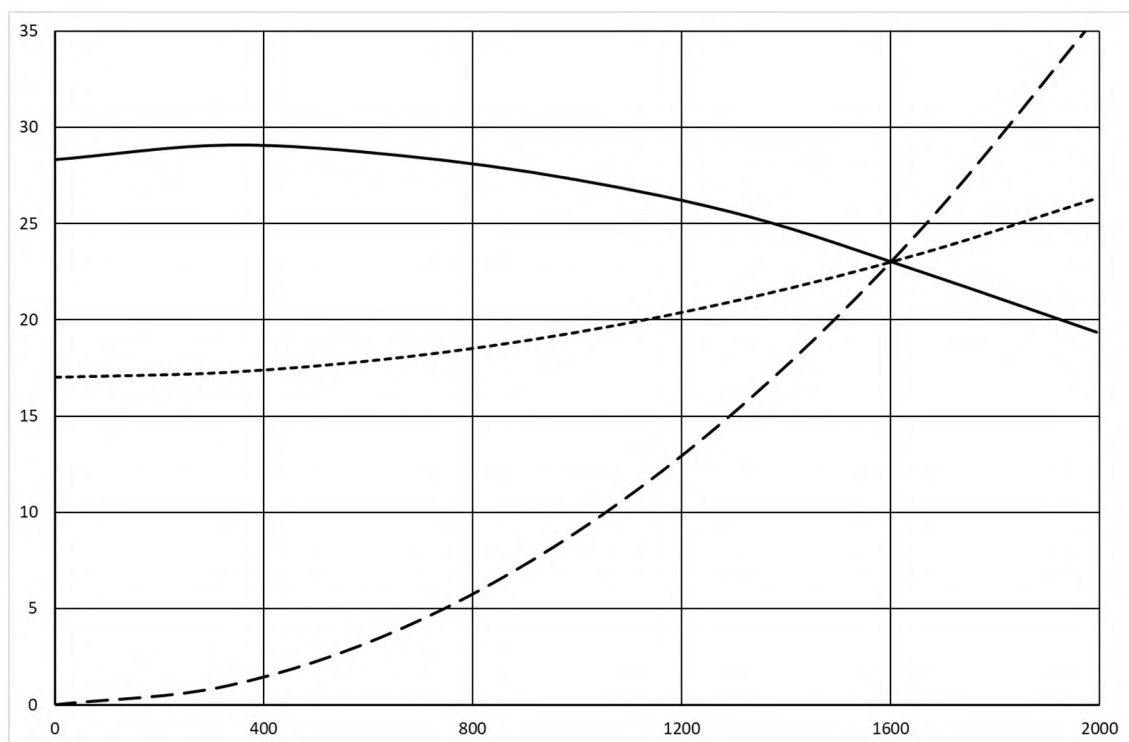


Рис. 6. Совместная напорная характеристика насоса Д2000-34 при измененной частоте вращения, напорно-расходная характеристика трубопровода и параболы подобных режимов

По графикам совместной работы ЦН и трубопровода определим, что в рабочей точке при измененной частоте вращения рабочего колеса  $n_{и} = 607$  об/мин: подача  $Q_H = 1600$  м<sup>3</sup>/час, напор  $H_m = 23$  м, мощность насоса составляет  $N_H = 51,4$  кВт и КПД -  $\eta = 87,5\%$ .

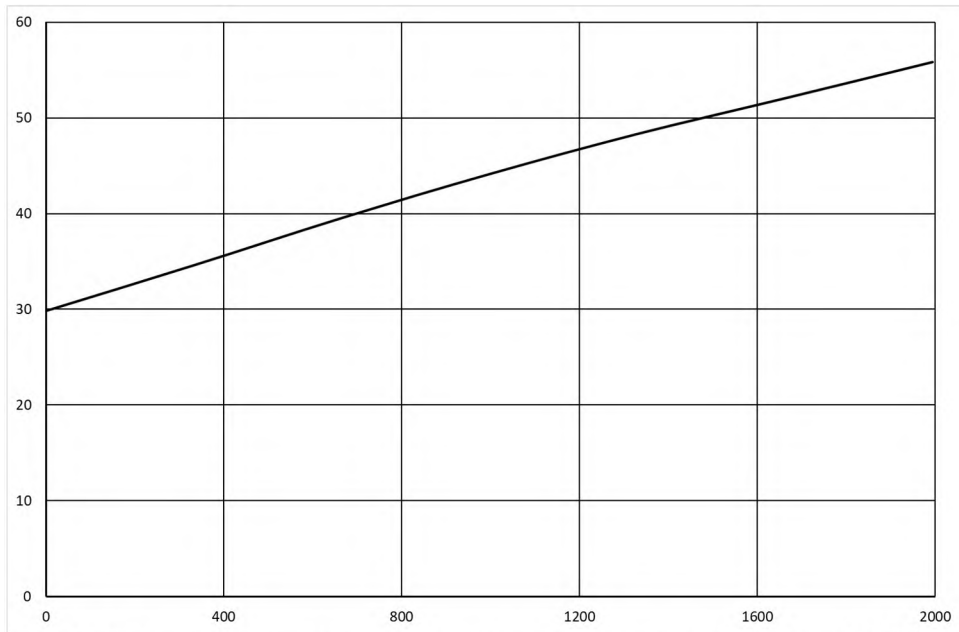


Рис. 7. Абсолютная энергетическая характеристика насоса Д2000-34 в кВт при измененной частоте вращения рабочего колеса

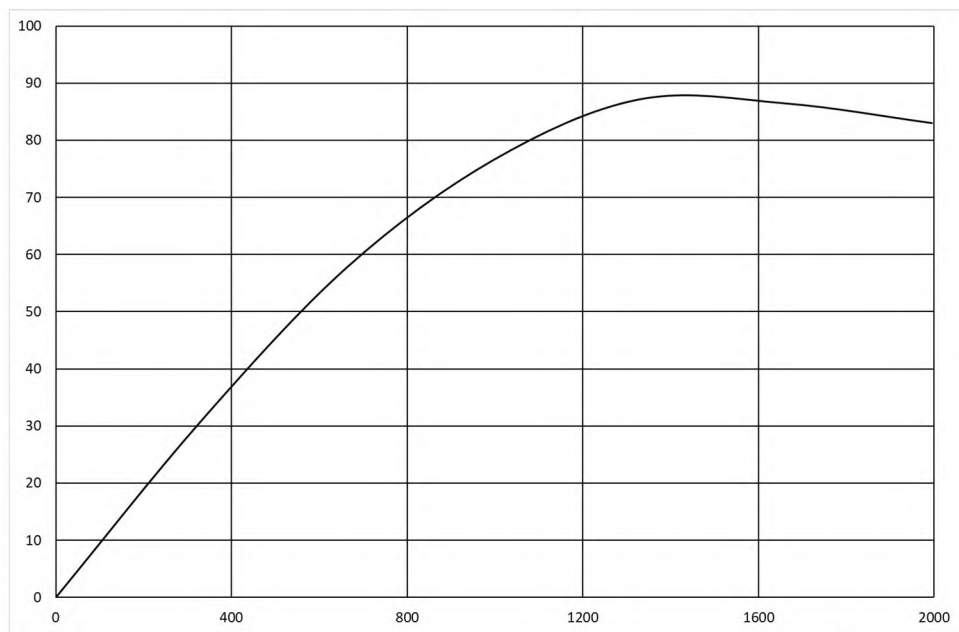


Рис. 8. Относительная энергетическая характеристика насоса Д2000-34 в % при измененной частоте вращения рабочего колеса

#### 4.1. Расчет потребляемой мощности насосной установки

Мощность, потребляемая насосным агрегатом при номинальной частоте вращения рабочего колеса:

$$N_{эл} = \frac{N_n}{\eta_{эл}},$$

где  $N_c$  - мощность насоса, кВт;  $\eta_{эл}$  - КПД электродвигателя определяем по каталогу (можно принять  $\eta_{эл} = 0,88 \dots 0,92$ ).

$$N_{эл} = \frac{99,2}{0,9} = 110,2 \text{ кВт}.$$

Мощность, потребляемая насосным агрегатом при измененной частоте вращения рабочего колеса:

$$N_{эл} = \frac{N_u}{\eta_{эл}},$$

где  $N_c$  - мощность насоса, кВт;  $\eta_{эл}$  - КПД электродвигателя определяем по каталогу (можно принять  $\eta_{эл} = 0,88 \dots 0,92$ ).

$$N_{эл} = \frac{51,4}{0,9} = 57,1 \text{ кВт}.$$

#### 4.2. Расчет показателей энергетической эффективности

Удельный расход электроэнергии (кВт/м<sup>3</sup>) насоса определяется по формуле

$$N_{уд} = \frac{N_{эл}}{Q_{H(u)}},$$

где  $N_{эл}$  - мощность потребляемая насосным агрегатом, кВт;  $Q_H$  – подача насоса при исходной частоте вращения, м<sup>3</sup>/час;  $Q_{и}$  – расчетная подача насоса при измененной частоте вращения, м<sup>3</sup>/час.

**По рассмотренным условиям задачи определяем:**

- удельный расход электроэнергии насосного агрегата при номинальной частоте вращения рабочего колеса

$$N_{уд} = \frac{110,2}{2530} = 0,044 \text{ кВт/м}^3;$$

- удельный расход электроэнергии насосного агрегата при измененной частоте вращения рабочего колеса при линейно-интегральном способе регулирования

$$N_{уд} = \frac{57,1}{1600} = 0,036 \text{ кВт/м}^3;$$

Удельная стоимость подачи 1 м<sup>3</sup> при стоимости электроэнергии  $a = 5$  руб/кВт

- при исходной частоте вращения

$$Ц_{уд} = 0,044 \cdot 5 = 0,22 \text{ руб/м}^3;$$

- при измененной частоте вращения рабочего колеса при линейно-интегральном способе регулирования

$$Ц_{уд} = 0,036 \cdot 5 = 0,18 \text{ руб/м}^3$$

## 5. Исходные данные индивидуальных заданий

Вариант индивидуального задания (таблица 3, практическая работа №1) содержит типоразмер центробежного насоса без обточки рабочего колеса, номинальную частоту вращения рабочего колеса (Приложение 1) и параметры характеристики трубопровода:  $H_T$  - геометрическая высота подъема воды трубопроводом, м;  $S$  - приведенный коэффициент сопротивления трубопровода,  $\text{м}/(\text{м}^3/\text{час})^2$ . Необходимо определить параметры совместной работы насоса и трубопровода при обеспечении в трубопроводе расчетной подачи  $Q_p$ ,  $\text{м}^3/\text{час}$  за изменения частоты вращения рабочего колеса при линейно-интегральном способе регулирования.

### Оформление отчета о практической работе

Отчет должен содержать следующие разделы:

- 5.1. Тема работы. Цель работы.
- 5.2. Способы регулирования изменением частоты вращения рабочего колеса.
- 5.3. Порядок выполнения расчетов при качественном регулировании параметров совместной работы системы насос трубопровод изменением частоты вращения рабочего колеса по максимальному напору в сети.
- 5.4. Расчет по индивидуальному заданию, который должен содержать:
  - исходные данные по типоразмеру насоса и параметрам трубопровода;
  - характеристики насоса заданного типоразмера;
  - расчет напорно-расходной характеристики трубопровода;
  - построение графиков совместной работы трубопровода и насоса с номинальной частотой вращения рабочего колеса (рис.2, 3 и 4);
  - определение параметров рабочей точки трубопровода и насоса с номинальной частотой вращения рабочего колеса;
  - определение параметров параболы подобных режимов по заданным параметрам рабочей точки трубопровода (рис. 5);
  - определение коэффициента изменения частоты вращения рабочего колеса;
  - построение графиков совместной работы трубопровода и насоса с измененной частотой вращения рабочего колеса (рис. 6, 7 и 8 );
  - определение параметров совместной работы трубопровода с насосом с измененной частотой вращения рабочего колеса;
  - расчет потребляемой мощности и показателей энергетической эффективности насосной установки.
- 5.5. Выводы о выполнении цели работы.

**Вопросы для самостоятельной работы:**

1. Способы представления характеристик центробежных насосов в зависимости от изменения частоты вращения рабочего колеса.
2. Определение границ рабочего поля центробежного насоса по условию возможного возникновения кавитационных режимов в насосе и трубопроводах при изменении частоты вращения рабочего колеса.
3. Определение границ рабочего поля центробежного насоса по условию недопустимым снижением КПД.
4. Определение мощности, КПД центробежного насоса при изменении частоты вращения рабочего колеса по максимальному напору в сети.

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА**

**Цель работы:** Практическое изучение экономической эффективности различных методов качественного регулирования параметров совместной работы центробежного насоса и трубопровода. Построение диаграмм удельных показателей энергетической и экономической эффективности различных методов качественного регулирования с учетом капитальных и эксплуатационных затрат для частотно-регулируемого привода ЦН. Ознакомиться с примером расчета. Выполнение работы по определению параметров энергетической и экономической эффективности различных методов качественного регулирования параметров совместной работы центробежного насоса и трубопровода.

### **1. Оценка энергетической эффективности качественных способов регулирования параметров совместной работы центробежного насоса и трубопровода**

Одним из основных качественных способов регулирования параметров совместной работы ЦН и трубопровода является частотно регулируемы электропривод, который применяется в системах управления частотой вращения рабочих колес насосных установок. Применение регулируемых электроприводов насосных агрегатов с ЦН на базе преобразователей частоты электрического тока дает возможность реализации различных способов изменения режимов работы систем насосный агрегат гидравлическая сеть путем приведения в соответствие режима работы насосов с режимом водопотребления. Характер изменения режимов водопотребления определяется случайно-вероятностными законами. Поэтому возможно применение различных способов регулирования параметров совместной работы центробежного насоса и трубопровода.

При выборе насосных агрегатов и способов их качественного регулирования необходимо учитывать характеристики ЦН, величину и характер изменение подачи, в виде напорно-расходной характеристики. Наибольшее влияние на эффективность качественного регулирования оказывает структура напоров в характеристике сети, то есть соотношение динамической и статической составляющих.

Удельная стоимость низковольтных частотных преобразователей, согласно работ проф. Б.С. Лезнова, могут достигать 80...100 € на кВт мощности приводного электродвигателя. Стоимость дополнительных затрат, связанных с использованием частотных преобразователей и дополнительных устройств управления могут достигать 30% от стоимости преобразователя. Сам частотный преобразователь не идеальный агрегат, так как имеет внутренние потери, которые могут достигать 2...5% от мощности привода. Частотные преобразователи, установленные в электрической сети, вызывают генерирование дополнительных гармоник переменного электрического тока, которые негативно влияют на его качество. Дополнительные гармоники, которые генерируются в распределительных сетях вызывают перегрузки в распределительных сетях, повышенный расход электроэнергии, помехи в сетях и телефонных линиях, перегрузки, вибрации, дополнительный шум трансформаторов и электродвигателей. Устранение дополнительных гармоник требует установки дополнительных фильтров и модификации электроустановки, что вызывает дополнительное увеличение капитальных затрат.

Анализ результатов применения частотно-регулируемого электропривода ЦН показывает, что в одних случаях его установка приводит к ощутимой экономии энергии, в других – она незначительна, в-третьих, установка такого привода не обеспечивает получение экономии энергии. Установка систем частотно-регулируемого электропривода требует дополнительных финансовых затрат. Поэтому кроме анализа энергетической эффективности различных систем частотно-регулируемого привода необходима оценка их экономической эффективности, которая позволяет установить ограничения на применение с учетом параметров совместной работы ЦН и трубопровода.

В качестве показателей для сравнения принимаются удельные показатели для 1000 м<sup>3</sup> подачи, а в качестве базы для сравнения принимаются удельные показатели для количественного регулирования дросселированием.

## **2. Определение удельных энергетических и экономических параметров различных способов качественного регулирования**

Удельный расход электроэнергии (кВт/м<sup>3</sup>) насоса с нерегулируемой подачей определяется по формуле

$$N_{уд} = \frac{N_{э}}{Q_H},$$

где  $N_{эл}$  - мощность потребляемая насосным агрегатом, кВт;  $Q_H$  – расчетная подача насоса при измененной частоте вращения, м<sup>3</sup>/час.

Удельная стоимость подачи  $1 \text{ м}^3$  в  $\text{руб}/\text{м}^3$  нерегулируемым ЦН при стоимости электроэнергии  $a$ ,  $\text{руб}/\text{кВт}$

$$C_{y\partial} = N_{y\partial} \cdot a.$$

Удельный расход электроэнергии ( $\text{кВт}/\text{м}^3$ ) насоса с регулируемой подачей частотным преобразователем определяется по формуле

$$N_{y\partial} = \frac{(1.02 \dots 1.05) \cdot N_{\partial}}{Q_H},$$

Установочная мощность электродвигателя для привода ЦН:

$$N_{\text{эд}} = K_N \cdot N_{\partial},$$

где  $K_N$  - коэффициент запаса мощности:  $K_N = 1,15$  при  $N_c < 270 \text{ кВт}$ :

Дополнительные капитальные и эксплуатационные затраты в € на установку частотных преобразователей и дополнительных устройств управления ЦН

$$\Delta K = 1,3 \cdot (80 \dots 100) \cdot N_{\text{эд}}.$$

Удельная стоимость подачи  $1 \text{ м}^3$  в  $\text{руб}/\text{м}^3$  регулируемым ЦН с частотным приводом

$$C_{y\partial} = N_{y\partial} \cdot a - \frac{\Delta K}{Q_2 \cdot L},$$

где  $Q_2$  - годовой объем перекачиваемой воды ЦН при расчетной подаче,  $\text{м}^3$ ,  
 $L$  - число лет эксплуатации регулируемого насоса ЦН с частотным приводом.  
 Годовой объем перекачиваемой воды при расчетной подаче  $Q_p$  в  $\text{м}^3/\text{час}$

$$Q_2 = Q_p \cdot F_2,$$

где  $F_2$  - годовой фонд работы регулируемого ЦН.



## 2. Пример выполнения задания работы

**Задание.** Центробежный насос Д2000-34 с частотой вращения рабочего колеса  $n_H = 730$  об/мин работает совместно с трубопроводом с параметрами  $H_T = 17$  м - геометрическая высота подъема воды трубопроводом;  $S = 1,48 \cdot 10^{-6}$  м/(м<sup>3</sup>/час)<sup>2</sup> — приведенные коэффициенты сопротивления трубопровода. Заданный расчетный расход в трубопроводе  $Q_p = 1600$  м<sup>3</sup>/час. Определить удельный расход электроэнергии и удельную стоимость подачи для количественного и различных способов качественного регулирования. Выполнить сравнительный анализ удельных показателей.

## 3. Построение характеристик насоса с исходной частотой вращения и сети при их совместной работе

По заданному типоразмеру из каталога насосов находим графическое изображение характеристик насоса Д2000-34 с частотой вращения рабочего колеса  $n = 730$  об/мин. Характеристики насоса представляем в табличной форме для 8 точек напорной и энергетических характеристики насоса в рабочем интервале подач, которые представим в таблице 1, на рис. 2, 3 и 4.

Напорно-расходная характеристика трубопровода для подач в м<sup>3</sup>/час записывается в виде

$$H_m = H_T + S \cdot Q^2 = 17 + 1,48 \cdot Q^2 \cdot 10^{-6}.$$

Подставим в эту характеристику трубопровода 8 значений подач в диапазоне значений подач рабочего поля характеристик насоса. Результаты расчета характеристики трубопровода приведем в табличной форме (таблица 1) и графической форме на рис. 2.

Напорная характеристика насоса при номинальной частоте вращения и характеристики трубопровода с открытой задвижкой

Таблица 1.

|                        |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q, м <sup>3</sup> /час | 0    | 400  | 800  | 1200 | 1600 | 2000 | 2400 | 2800 |
| $H_H, м$               | 41,0 | 42,1 | 41,3 | 39,5 | 36,7 | 32,5 | 28,0 | 23,5 |
| $H_m, м$               | 17,0 | 17,2 | 17,9 | 19,1 | 20,8 | 22,9 | 25,5 | 28,6 |
| N, кВт                 | 52,0 | 60,3 | 68,9 | 76,9 | 84,2 | 90,7 | 97,3 | 103  |
| $\eta, \%$             | 0    | 33,5 | 59,4 | 77,4 | 87,6 | 88,5 | 84,6 | 78,1 |

Построим напорную характеристика насоса и нанесем на нее полученную характеристику трубопровода, как показано на рис. 1.

Точка пересечения напорной характеристики насоса и характеристики трубопровода является рабочей точкой устойчивой работы насосной установки с параметрами подача  $Q_H = 2530 \text{ м}^3/\text{час}$  и напор  $H_H = 26,5 \text{ м}$ . Следовательно, при совместной работе насоса при частоте вращения рабочего колеса  $n = 730 \text{ об/мин}$  и трубопровода подача насоса значительно больше, чем расчётная  $Q_p = 1600 \text{ м}^3/\text{час}$ . Для обеспечения расчётной подачи в трубопроводе выполним расчет характеристики трубопровода при увеличении сопротивления в нем за счет увеличения сопротивления при закрытии задвижки.

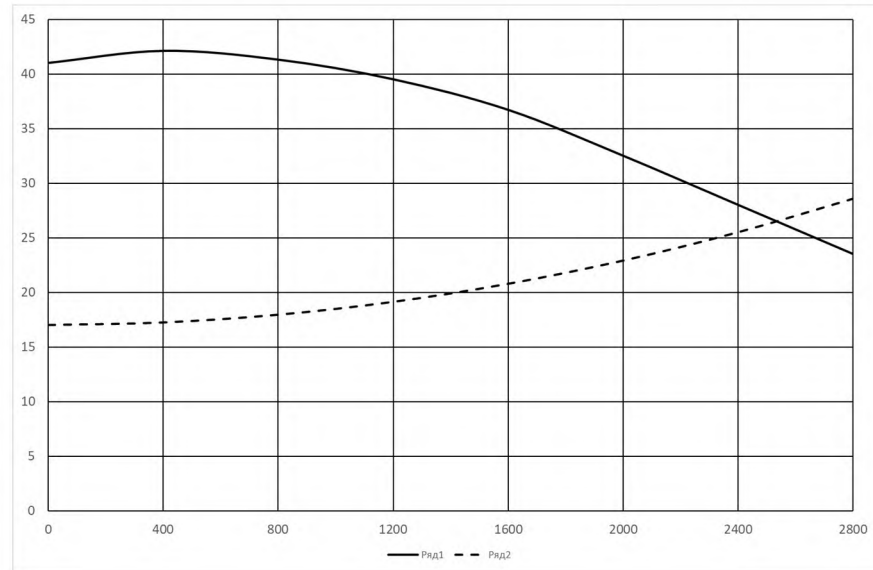


Рис. 1. Совместная напорная характеристика насоса Д2000-34 и трубопровода

По табличным данным таблицы 1 построим энергетические характеристики для мощности насоса (рис. 2) и его КПД (рис. 3) в зависимости от его подачи. По графику определим, что в рабочей точке при подаче  $Q_H = 2530 \text{ м}^3/\text{час}$  мощность насоса составляет  $N_H = 99,2 \text{ кВт}$  при частоте вращения рабочего колеса  $n = 730 \text{ об/мин}$ , и КПД -  $\eta = 82,7\%$ .

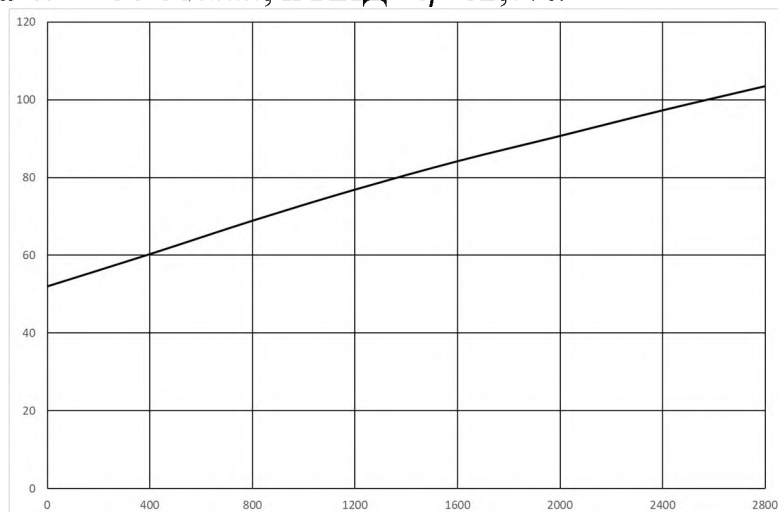


Рис. 2. Абсолютная энергетическая характеристика насоса Д2000-34 в кВт

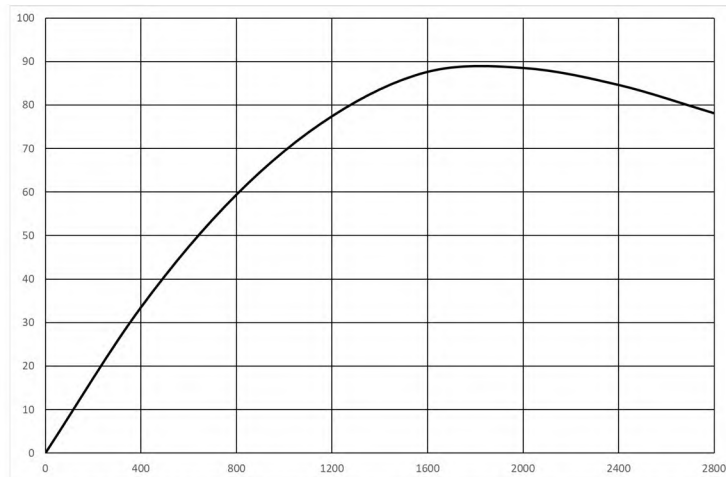


Рис.3. Относительная энергетическая характеристика насоса Д2000-34 в %

### 3.1. Построение характеристики сети для обеспечения расчетной подачи

Для обеспечения расчетной подачи  $Q_p = 1600 \text{ м}^3/\text{час}$  необходимо чтобы характеристика сети проходила через точку с этой подачей и напором  $H_p = 36,7 \text{ м}$ . Это может быть обеспечено количественным регулированием работы системы насос-трубопровод, т.е. прикрытием задвижки. При этом характеристика трубопровода при прикрытой задвижке представим в виде:

$$H_{m.z.} = H_{\Gamma} + S_s \cdot Q^2,$$

где коэффициент  $S_s$  - приведенный коэффициент сопротивления при прикрытой задвижке определим по выражению:

$$S_s = \frac{H_p - H_{\Gamma}}{Q_p^2},$$

$$S_s = \frac{36,7 - 17}{1600^2} = 7,695 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}}{\text{м}^6/\text{ч}^2}.$$

Напорно-расходная характеристика трубопровода при прикрытой задвижке для подач в  $\text{м}^3/\text{час}$  записывается в виде

$$H_{m.z.} = H_{\Gamma} + S \cdot Q^2 = 17 + 7,695 \cdot Q^2 \cdot 10^{-6}.$$

Задавшись 8-ю значениями подачи  $Q$  по этой характеристике строим характеристику трубопровода при прикрытой задвижке, которая показана на рис. 4, а результаты показаны в таблице 2.

Напорная характеристика насоса при номинальной частоте вращения  
 результаты расчета характеристики трубопровода с прикрытой задвижкой  
 Таблица 2.

| Q, м <sup>3</sup> /час | 0    | 400  | 800  | 1200 | <b>1600</b> | 2000 | 2400 | 2800 |
|------------------------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|
| $H_n, м$               | 41,0 | 42,1 | 41,3 | 39,5 | <b>36,7</b> | 32,5 | 28,0 | 23,5 |
| $H_m, м$               | 17,0 | 18,2 | 21,9 | 28,1 | <b>36,7</b> | 47,8 | 61,3 | 77,3 |
| $N, кВт$               | 52,0 | 60,3 | 68,9 | 76,9 | <b>84,2</b> | 90,7 | 97,3 | 103  |
| $\eta, \%$             | 0    | 33,5 | 59,4 | 77,4 | <b>87,6</b> | 88,5 | 84,6 | 78,1 |

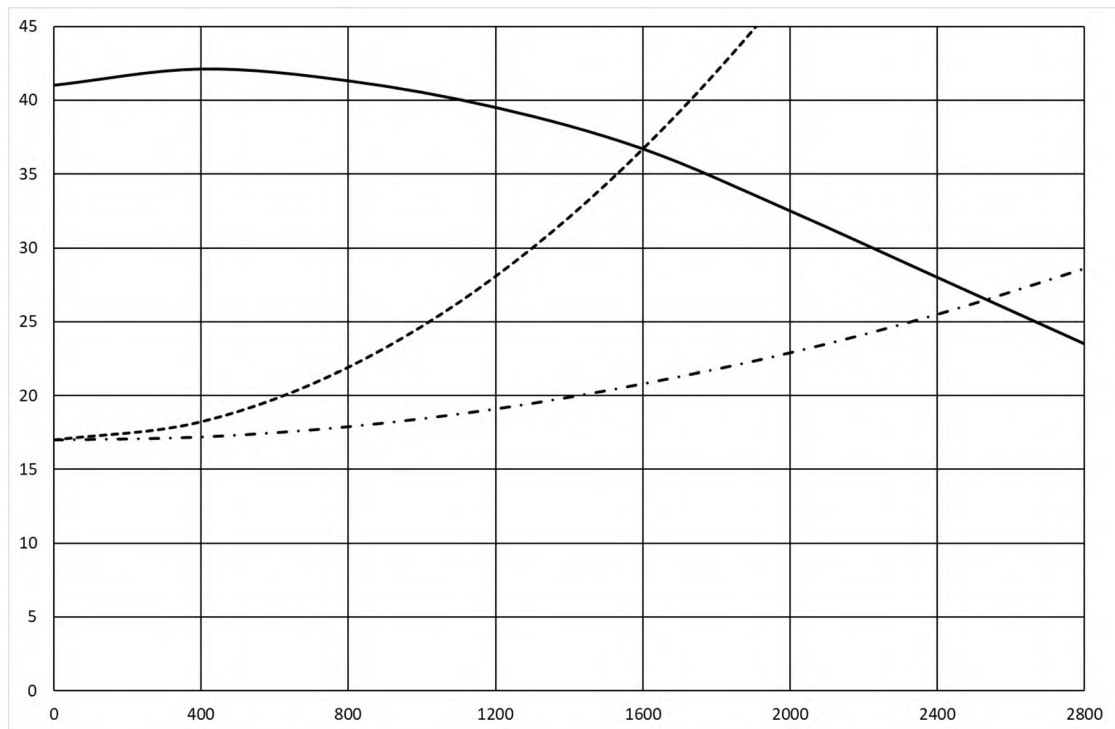


Рис. 4. Совместная напорная характеристика насоса Д2000-34 и трубопровода с открытой и прикрытой задвижкой

### 3.2. Расчет потребляемой мощности насосной установкой

Мощность, потребляемая насосным агрегатом при номинальной частоте вращения рабочего колеса и прикрытой задвижке:

$$N_{эл} = \frac{N_n}{\eta_{эл}},$$

где  $N_n$  - мощность насоса, кВт;  $\eta_{эл}$  - КПД электродвигателя определяем по каталогу (можно принять  $\eta_{эл} = 0,88...0,92$ ).

$$N_{эл} = \frac{84,2}{0,9} = 93,6 \text{ кВт}.$$

Удельный расход электроэнергии насосного агрегата при номинальной частоте вращения рабочего колеса и прикрытой задвижке на расчётную подачу  $Q_p = 1600 \text{ м}^3/\text{час}$ .

$$N_{y\partial} = \frac{93,6}{1600} = 0,059 \text{ кВт}/\text{м}^3.$$

Удельная стоимость подачи  $1 \text{ м}^3$  при стоимости электроэнергии  $a = 5 \text{ руб}/\text{кВт}$  при номинальной частоте вращения рабочего колеса и количественном регулировании расчетной подачи

$$Ц_{y\partial} = 0,059 \cdot 5 = 0,295 \text{ руб}/\text{м}^3;$$

#### 4. Сравнительный анализ удельных показателей насосной установки при различных способах и видах регулирования параметров

Результаты расчета удельных показателей по удельному расходу электроэнергии, которые определены в практических работах 3-6 для заданного типоразмера ЦН и расчетной подачи  $Q_p = 1600 \text{ м}^3/\text{час}$  представим в таблице 3.

Удельный расход электроэнергии в кВт на  $1 \text{ м}^3$  и на  $1000 \text{ м}^3$  при различных способах регулирования

Таблица 3

| Способы и виды регулирования            |                         | $1 \text{ м}^3$ | $1000 \text{ м}^3$ |
|---|-------------------------|-----------------|--------------------|
| Количественное                          |                         | 0,059           | 59                 |
| Качественное частотным преобразователем | интегральное            | 0,033           | 33                 |
|   | по максимальному напору | 0,042           | 42                 |
|   | линейно-интегральное    | 0,037           | 37                 |

Для качественного регулирования частотным преобразователем удельные показатели в таблице 3 определены с учетом дополнительного расхода энергии на систему регулирования в размере 3% от мощности привода, то есть

$$N_{y\partial m} = 1,03 \cdot N_{y\partial}$$

Установочная мощность электродвигателя для привода ЦН принимается по максимальной мощности при номинальной частоте вращения рабочего колеса:

$$N_{\varepsilon\partial} = K_N \cdot N_{\varepsilon\partial m} = 1,15 \cdot 103 \geq 118 \text{ кВт},$$

где  $K_N$  - коэффициент запаса мощности:  $K_N = 1,15$  при  $N_c < 270 \text{ кВт}$ :

Дополнительные капитальные и эксплуатационные затраты в € на установку частотных преобразователей и дополнительных устройств управления ЦН

$$\Delta K = 1,3 \cdot (80 \dots 100) \cdot N_{\text{эд}}$$

Удельная стоимость подачи 1 м<sup>3</sup> в руб/м<sup>3</sup> регулируемым ЦН с частотным преобразователем электропривода

$$C_{\text{уд}} = N_{\text{уд}} \cdot a + \frac{\Delta K}{Q_2 \cdot L} = N_{\text{уд}} + \Delta K_{\text{уд}}$$

где  $Q_2$  - годовой объем перекачиваемой воды ЦН при расчетной подаче, м<sup>3</sup>,  
 $L$  - число лет эксплуатации регулируемого насоса ЦН с частотным приводом,  
 $\Delta K_{\text{уд}}$  - приведенные капитальные и эксплуатационные затраты на число лет эксплуатации.

Годовой объем перекачиваемой воды при расчетной подаче  $Q_p$  в м<sup>3</sup>/час

$$Q_2 = Q_p \cdot F_2,$$

где  $F_2$  - годовой фонд работы регулируемого ЦН.

Годовой фонд работы регулируемого ЦН с частотным преобразователем электропривода принимаем  $F_2 = 200 \cdot 24 = 4800 \text{ час}$ .

По условию задания

- годовой объем перекачиваемой воды при  $Q_p = 1600 \text{ м}^3/\text{час}$

$$Q_2 = 1600 \cdot 4800 = 7680000 \text{ м}^3,$$

- дополнительные капитальные и эксплуатационные затраты в € на установку частотных преобразователей и дополнительных устройств управления ЦН

$$\Delta K = 1,3 \cdot 90 \cdot 118 = 13806 \text{ €}.$$

Соответственно затраты в рублях

$$\Delta K = 13806 \cdot 70 = 966420 \text{ руб.}$$

Приведенные капитальные и эксплуатационные затраты в рублях на установку частотных преобразователей и дополнительных устройств управления ЦН

- на 1 год эксплуатации

$$\Delta K_{\text{уд}} = \frac{\Delta K}{Q_2 \cdot L} = \frac{966420}{7680000 \cdot 1} = 0,126 \text{ руб}/\text{м}^3$$

- на 2 года эксплуатации

$$\Delta K_{\text{уд}} = \frac{966420}{7680000 \cdot 2} = 0,063 \text{ руб/м}^3.$$

- на 3 года эксплуатации

$$\Delta K_{\text{уд}} = \frac{\Delta K}{Q_2 \cdot L} = \frac{966420}{7680000 \cdot 3} = 0,042 \text{ руб/м}^3$$

Результаты расчета удельной стоимости подачи 1 м<sup>3</sup> при стоимости электроэнергии  $a = 5$  руб/кВт по удельной стоимости подачи, которые определены в практических работах 3-6 для заданного типоразмера ЦН и расчетной подачи  $Q_p = 1600$  м<sup>3</sup>/час с учетом приведенных капитальных и эксплуатационных затраты на установку частотных преобразователей и дополнительных устройств управления ЦН на период эксплуатации  $L = 1,2$  и 3 года представим в таблице 4, а для подачи 1000 м<sup>3</sup> в таблице 5

Удельная стоимость подачи 1 м<sup>3</sup> в руб при различных способах регулирования и сроках эксплуатации

Таблица 4

| Способы и виды регулирования            |                         | 1 год | 2 года | 3 года |
|---|-------------------------|-------|--------|--------|
| Количественное                          |                         | 0,295 | 0,295  | 0,295  |
| Качественное частотным преобразователем | интегральное            | 0,286 | 0,223  | 0,202  |
|   | по максимальному напору | 0,331 | 0,268  | 0,247  |
|   | линейно-интегральное    | 0,306 | 0,243  | 0,222  |

Удельная стоимость подачи 1000 м<sup>3</sup> в руб при различных способах регулирования и сроках эксплуатации

Таблица 4

| Способы и виды регулирования            |                         | 1 год | 2 года | 3 года |
|---|-------------------------|-------|--------|--------|
| Количественное                          |                         | 295   | 295    | 295    |
| Качественное частотным преобразователем | интегральное            | 286   | 223    | 202    |
|   | по максимальному напору | 331   | 268    | 247    |
|   | линейно-интегральное    | 306   | 243    | 222    |

## 5. Оценка эффективности установки частотного преобразователя

Эффективность от установки частотного преобразователя для обеспечения расчетной подачи при совместной работе центробежного насоса Д2000-34 с трубопроводом с заданными параметрами выполним по энергетической эффективности и по технико-экономической эффективности

Энергетическую эффективность оценим в результате сравнения удельных расходов энергии на подачу  $1 \text{ м}^3$  при количественном регулировании дросселированием и различных способах качественного регулирования по зависимости:

$$\text{ЭЭ}\% = \frac{N_{\text{удд}} - N_{\text{удч}}}{N_{\text{удд}}} \cdot 100\%,$$

где  $N_{\text{удд}}$  - удельный расход электроэнергии насосного агрегата при дроссельном регулировании,  $N_{\text{удч}}$  - удельный расход электроэнергии насосного агрегата при различных способах частотного регулирования.

Результаты расчёта энергетической эффективности в % для различных способов частотного регулирования показаны на рис. 5, где 1 – интегральное, 2 – по максимальному напору в сети, 3 – линейно-интегральное.

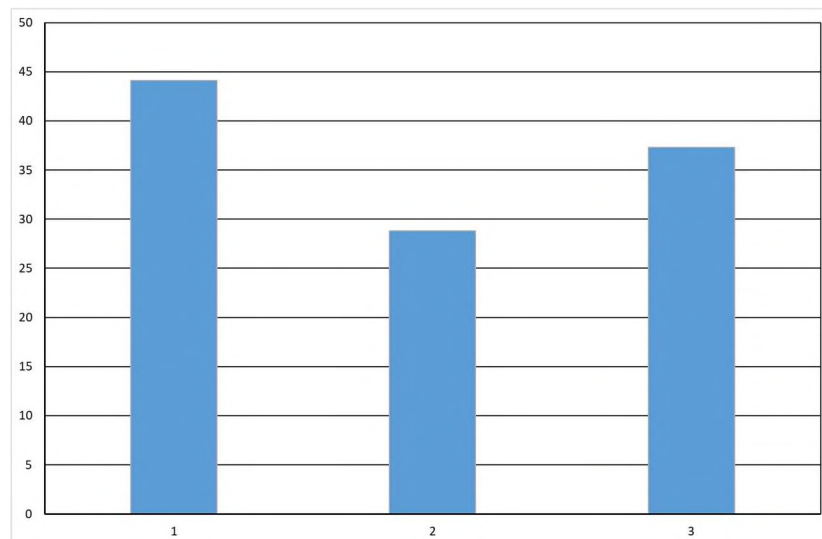


Рис. 5. Энергетическая эффективность различных способов частотного регулирования: 1 – интегральное, 2 – по максимальному напору в сети, 3 – линейно-интегральное.

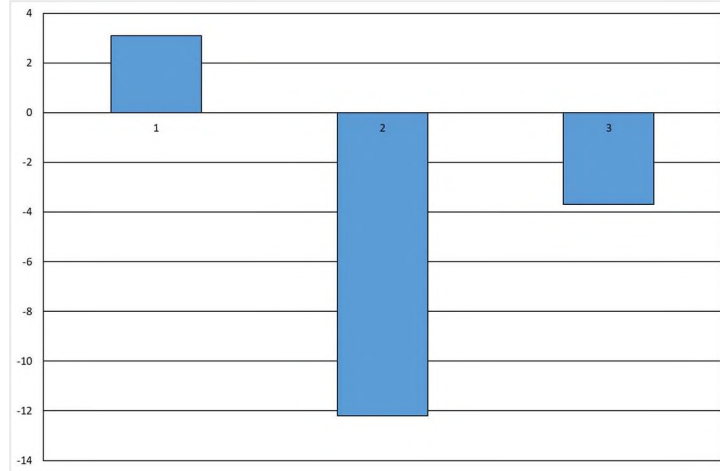
Технико-экономическая эффективность оценим в результате сравнения удельной стоимости подачи  $1 \text{ м}^3$  при количественном регулировании дросселированием и различных способах качественного регулирования по зависимости:

$$\text{ЭТЭ}\% = \frac{C_{\text{удд}} - C_{\text{удч}}}{C_{\text{удд}}} \cdot 100\%,$$

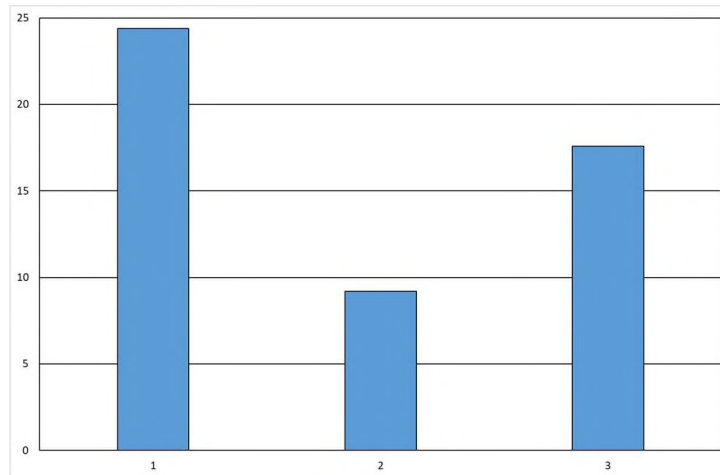
где  $C_{\text{удд}}$  - Удельная стоимость подачи  $1 \text{ м}^3$  насосного агрегата при дроссельном регулировании,  $C_{\text{удч}}$  - Удельная стоимость подачи  $1 \text{ м}^3$  насосного агрегата при различных способах частотного регулирования.



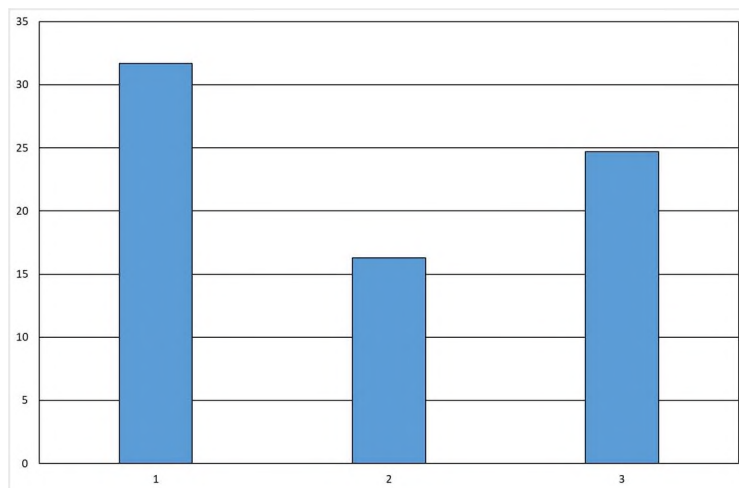
Результаты расчёта энергетической эффективности в % для различных способов частотного регулирования показаны на рис. 6, где 1 – интегральное, 2 – по максимальному напору в сети, 3 – линейно-интегральное: а – срок эксплуатации 1 год, б – срок эксплуатации 2 года; в – срок эксплуатации 3 года.



а



б



в

Рис. 6. Техничко-экономическая эффективность различных способов частотного регулирования: 1 – интегральное, 2 – по максимальному напору в сети, 3 – линейно-интегральное; при сроках эксплуатации: а – 1 год, б – 2 года; в – 3 года.

## 6. Исходные данные индивидуальных заданий

Вариант индивидуального задания (таблица 3, практическая работа №1) содержит типоразмер ЦН, номинальную частоту вращения (Приложение 1) и параметры характеристики трубопровода:  $H_T$  - геометрическая высота подъема воды трубопроводом, м;  $S$  - приведенный коэффициент сопротивления трубопровода,  $\text{м}/(\text{м}^3/\text{час})^2$ . Необходимо определить параметры совместной работы насоса и трубопровода при обеспечении в трубопроводе расчетной подачи  $Q_p$  в  $\text{м}^3/\text{час}$  при дроссельном регулировании, выполнить оценку эффективности от установки частотного преобразователя с различными способами регулирования для обеспечения расчетной подачи при совместной работе ЦН с трубопроводом с заданными параметрами. Энергетическую и технико-экономическую эффективность оценивать в результате сравнения удельных расходов энергии на подачу  $1 \text{ м}^3$  и удельной стоимости на подачу  $1 \text{ м}^3$  при количественном регулировании дросселированием и при различных способах качественного регулирования, которые определены в практических работах 3, 4, 5.

### Оформление отчета о практической работе

Отчет должен содержать следующие разделы:

Тема работы. Цель работы.

Параметры оценки эффективности различных способов частотного регулирования совместной работы насоса и трубопровода при обеспечении расчетной подачи.

Порядок выполнения оценки эффективности различных способов частотного регулирования совместной работы насоса и трубопровода при обеспечении расчетной подачи.

Анализ результатов оценки эффективности различных способов частотного регулирования при качественном регулировании параметров совместной работы

#### 6.1. Расчет по индивидуальному заданию, который должен содержать:

- исходные данные по типоразмеру насоса и параметрам трубопровода;
- характеристики насоса заданного типоразмера;
- расчет напорно-расходной характеристики трубопровода;
- построение графиков совместной работы трубопровода и насоса с номинальной частотой вращения рабочего колеса при открытой и закрытой задвижке (рис. 1, 2, 3 и 4);

- определение удельного расхода электроэнергии в кВт на  $1 \text{ м}^3$  и на  $1000 \text{ м}^3$  при различных способах регулирования параметров совместной работы;
- определение удельной стоимости подачи  $1 \text{ м}^3$  в руб при различных способах регулирования и сроках эксплуатации;
- оценка энергетической и технико-экономической эффективности установки частотного преобразователя при различных способах регулирования и сроках эксплуатации;
- выполнить анализ эффективности установки частотного преобразователя при различных способах регулирования и сроках эксплуатации.

### **Вопросы для самостоятельной работы:**

1. Определение установочной мощности электродвигателя для привода ЦН.
2. Дополнительные капитальные и эксплуатационные затраты на установку частотных преобразователей и дополнительных устройств управления ЦН.
3. Определение удельной стоимости подачи в регулируемом ЦН с частотным преобразователем электропривода с учетом дополнительных капитальных и эксплуатационных затрат на установку частотных преобразователей и дополнительных устройств управления ЦН.
4. Способы оценки энергетической и технико-экономической эффективности установки частотного преобразователя при различных способах регулирования и сроках эксплуатации представления характеристик центробежных насосов в зависимости от изменения частоты вращения рабочего колеса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Карелин В.Я., Минаев А.В. Насосы и насосные станции: Учебник для вузов. - 2-е изд., перераб. И доп. - М.: Стройиздат, 1986. - 320 с.
2. Карасев Б.В. Насосные и воздухоудные станции. М.: Высшая школа, 1990. – 268 с.
3. Насосные станции. Курсовое проектирование/ Э.В.Залуцкий, А.И.Петрухно. - К.: Вища шк., 1987. - 167 с.
4. Насосы и насосные станции/Под ред. В.Ф. Чебаевского. - М.: Агропромиздат, 1989.
5. Поляков В.В., Скворцов Л.С. Насосы и вентиляторы: Учебник для вузов. - М.: Стройиздат, 1990. - 336 с.
6. Проектирование насосных станций и испытание насосных установок /Под ред. В.Ф.Чебаевского. - М.: Колос, 1982. - 320 с.
7. Березин С.Е. Насосные станции и погружными насосами. – М.: Стройиздат, 2008. – 160 с.
8. Березин С.Е., Баженов В.И. Воздуходувные станции с регулируемыми центробежными компрессорами. – Симферополь, ИТ «АРИАЛ», 2019. – 188 с.
9. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.

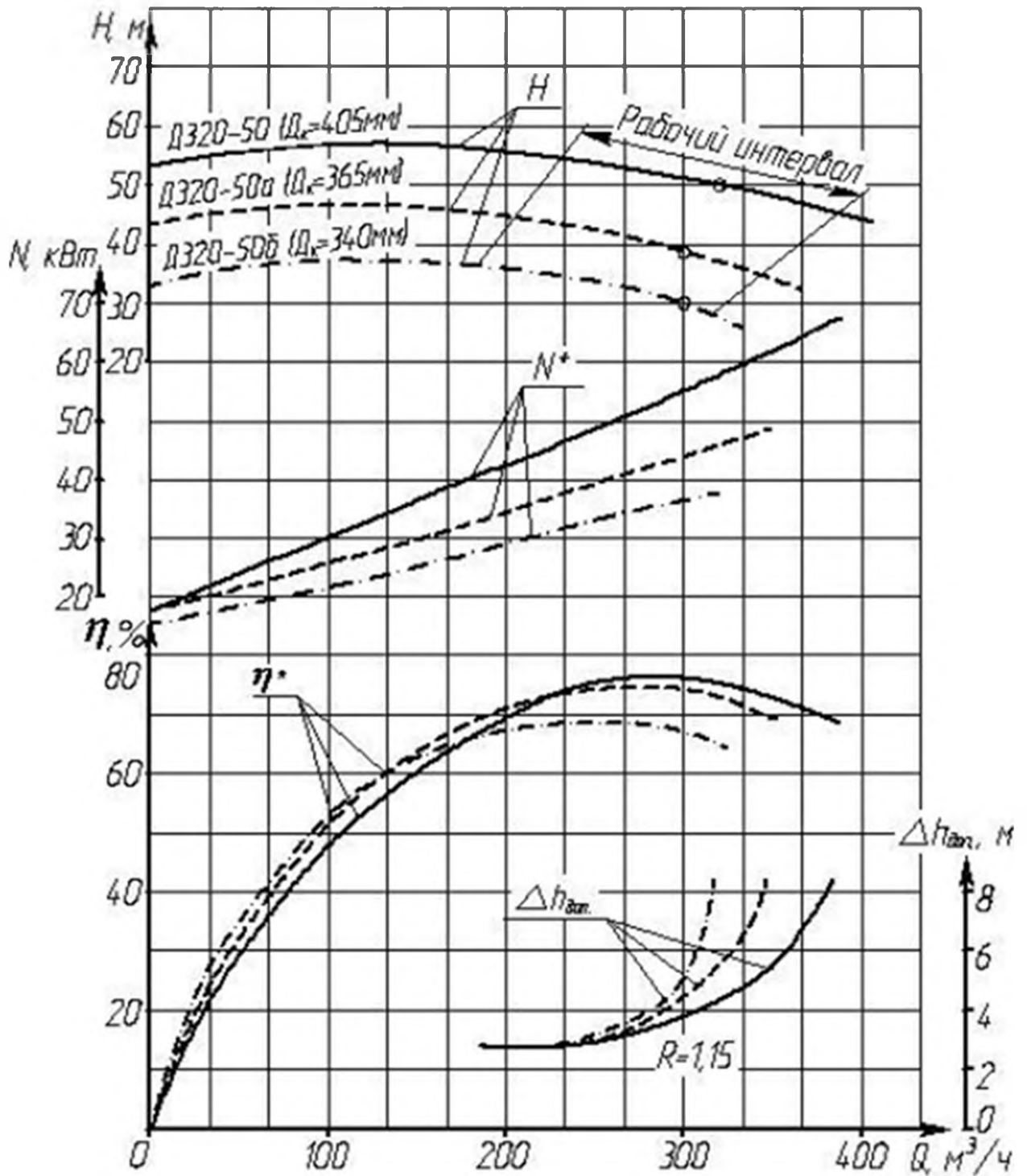
## ПРИЛОЖЕНИЯ

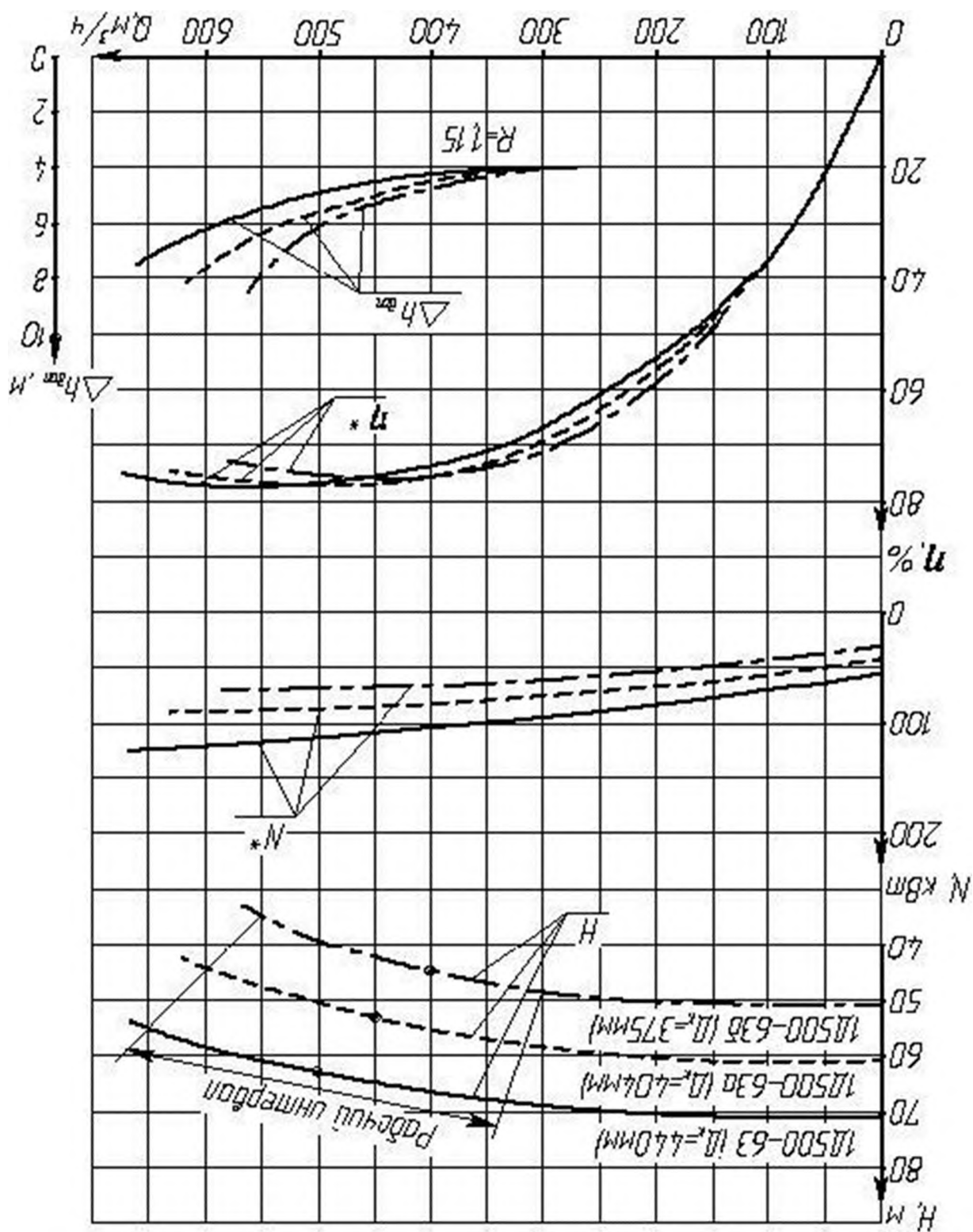
Характеристика насоса (агрегата) Д320-50

Частота вращения  $24,2 \text{ с}^{-1}$  (1450 об/мин)

Жидкость — вода плотность  $1000 \text{ кг/м}^3$

\* — данные для насоса





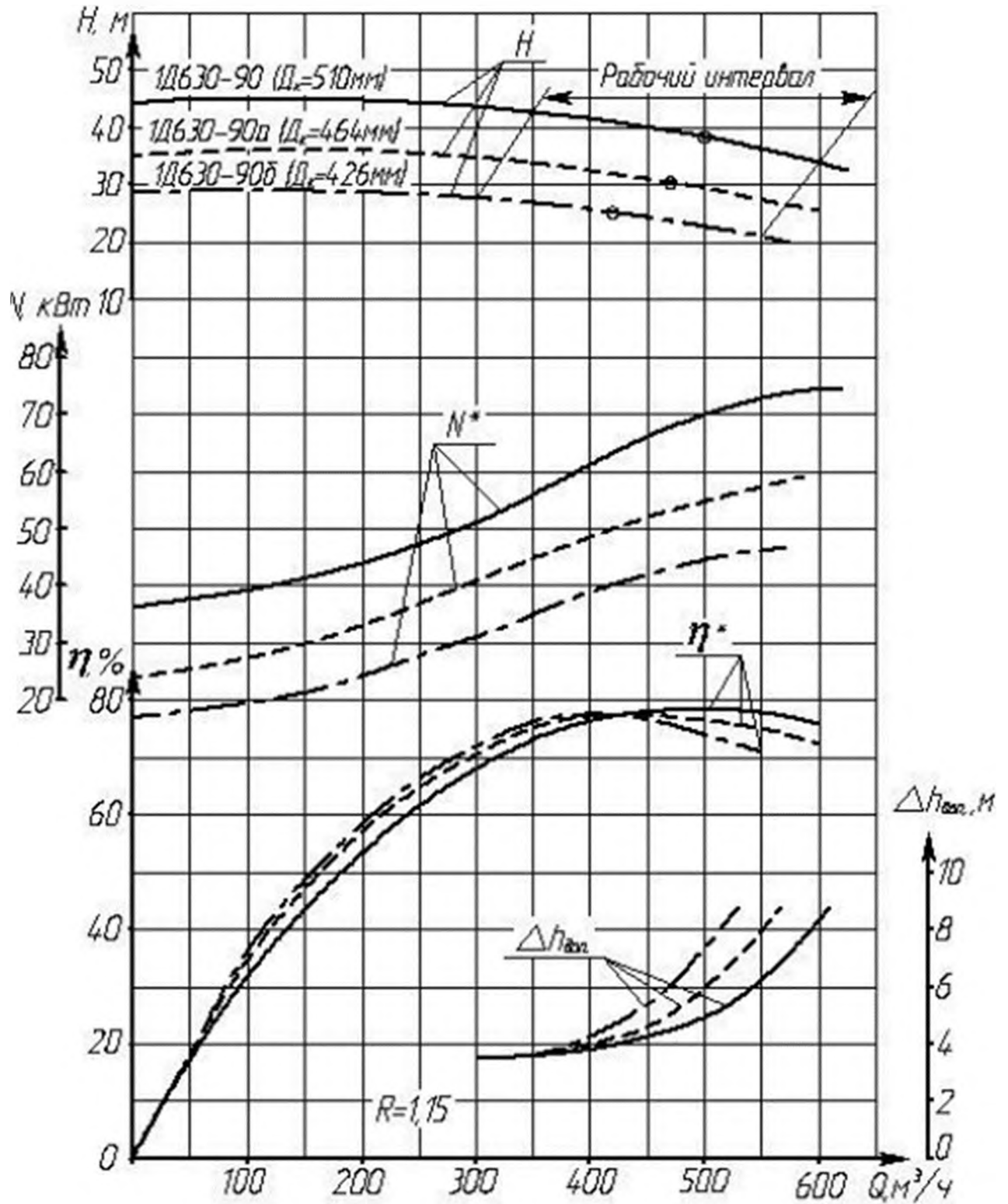
\* - димензії для масової частини  
 Жидкість - вода, густота  $1000 \text{ кг/м}^3$   
 Частота обертання  $24,2 \text{ с}^{-1}$  ( $n=14500 \text{ об/хв}$ )  
 Характеристика масової частини  $11500-63$

Характеристика насоса (агрегата) 1Д630-90

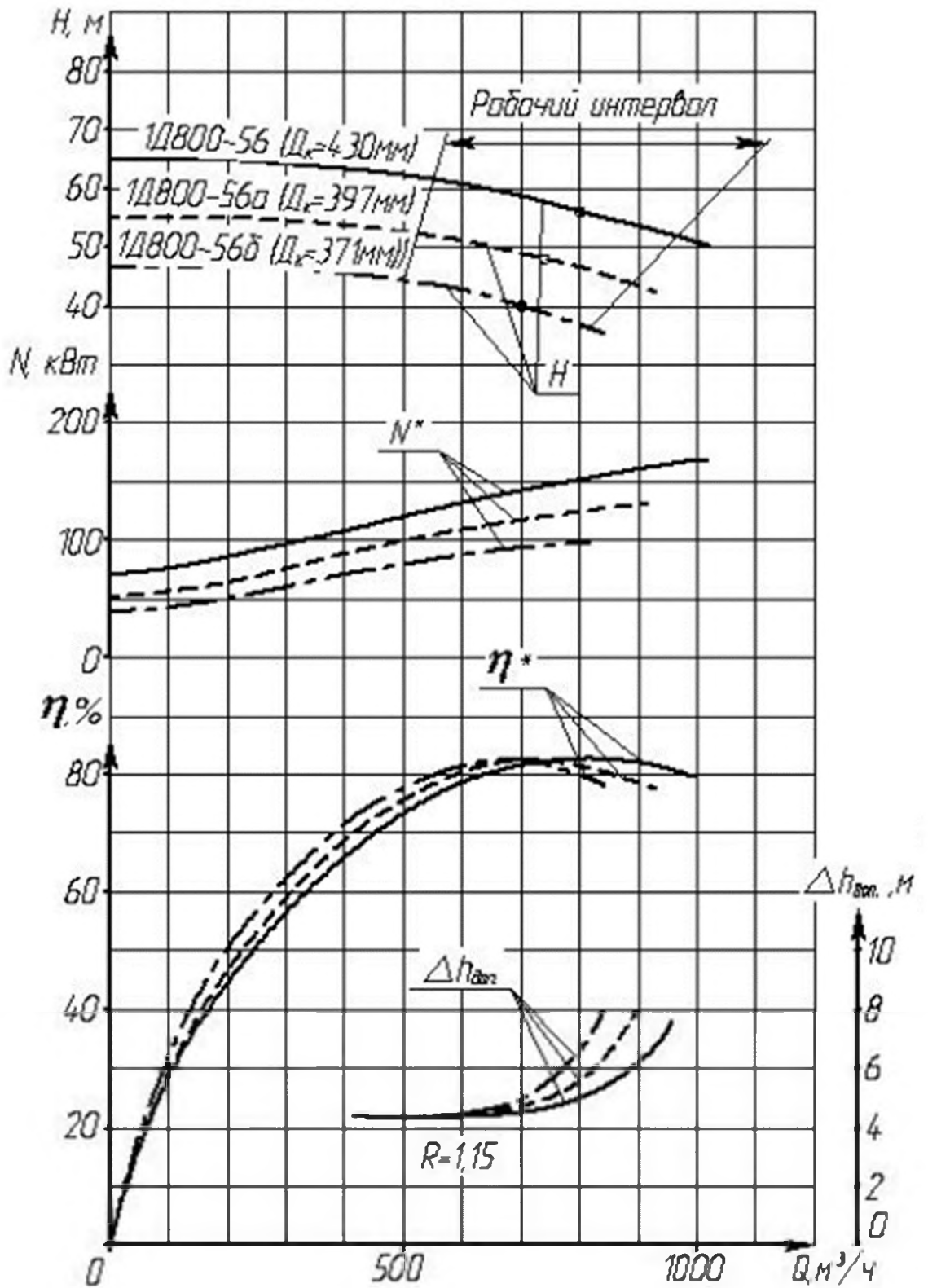
Частота вращения  $16,3 \text{ с}^{-1}$  ( $n=980 \text{ об/мин}$ )

Жидкость - вода плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$

\* - данные для насоса

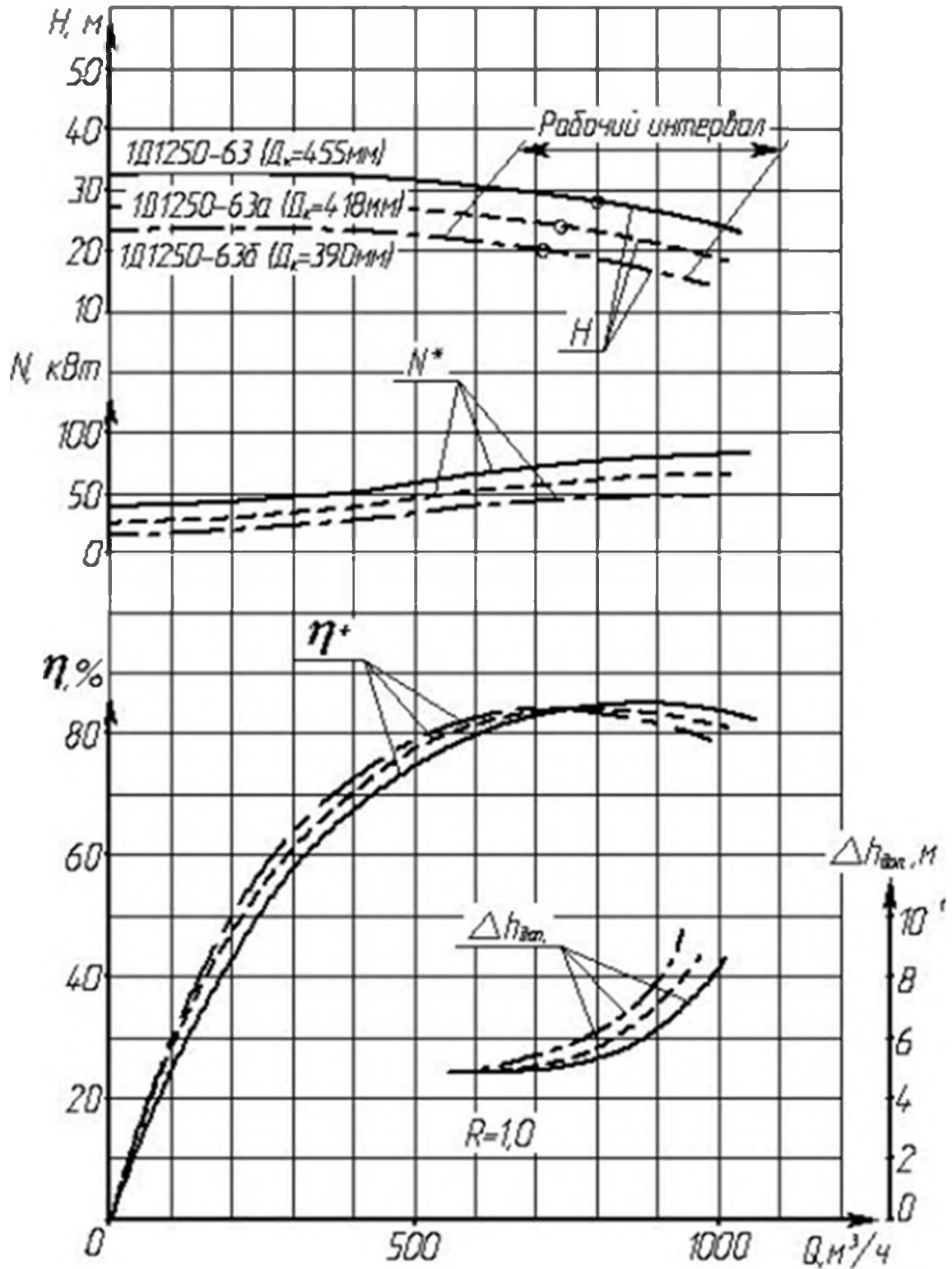


Характеристика насоса (агрегата) 1Д800-56  
 Частота вращения  $24,2 \text{ с}^{-1}$  ( $n=1450 \text{ об/мин}$ )  
 Жидкость – вода, плотность  $1000 \text{ кг/м}^3$   
 \* – данные для насоса

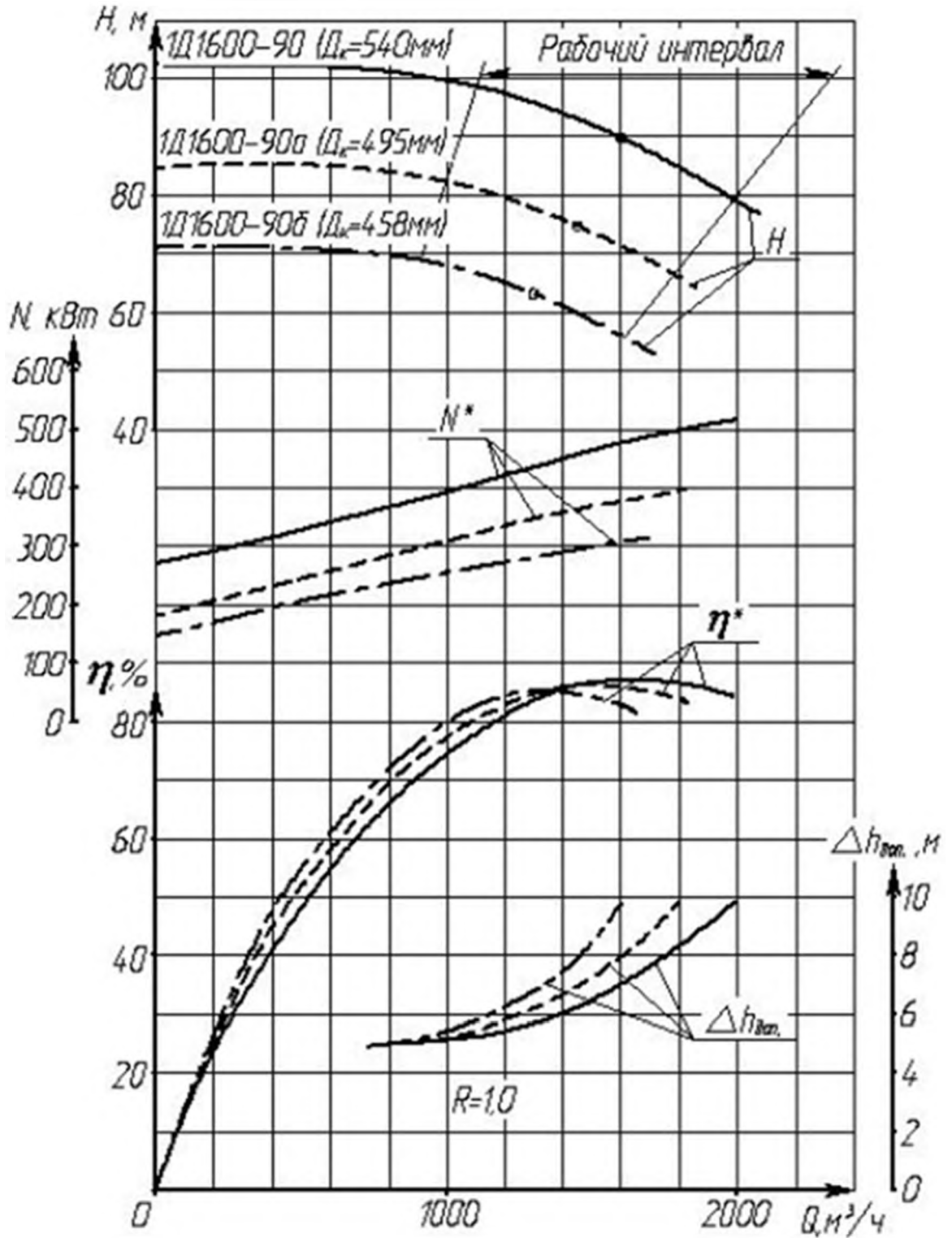




Продолжение приложения А  
 Характеристика насоса (агрегата) 1Д1250-63  
 Частота вращения  $16,3 \text{ с}^{-1}$  ( $n=980 \text{ об/мин}$ )  
 Жидкость - вода плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$   
 \* - данные для насоса



Продолжение приложения А  
 Характеристика насоса (агрегата) 1Д1600-90  
 Частота вращения  $24,2 \text{ с}^{-1}$  ( $n=1450 \text{ об/мин}$ )  
 Жидкость - вода, плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$   
 \* - данные для насоса



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В. И. ВЕРНАДСКОГО»**

**АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ**

**ФАКУЛЬТЕТ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭНЕРГЕТИКИ**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ СИСТЕМ  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ (ПЕРВАЯ ЧАСТЬ)**

**Методические указания**

по выполнению практических занятий

направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства,  
направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны  
водных ресурсов»

Симферополь

2019

Технологические процессы и оборудование систем водоснабжения и водоотведения (первая часть): Методические указания к практическим занятиям для обучающихся направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов». – Симферополь, 2019. – 42 с.

Методические указания предназначены для обучающихся по направлению подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» при изучении дисциплины «Технологические процессы и оборудование систем водоснабжения и водоотведения (первая часть)».

Составитель: Николенко И.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники.

Утверждено на заседании учебно-методической комиссии факультета водных ресурсов и энергетики от 24 апреля 2019 года, протокол № 8.

Одобрено на заседании кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники от 17 апреля 2019 года, протокол № 17.

© Николенко И.В., 2019

©ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского», АСиА, 2019

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Эксплуатация систем и сооружений водоснабжения и водоотведения» составлены в соответствии с учебным планом по строительным направлениям бакалавриата.

В методических указаниях рассматриваются примеры решения типовых задач по дисциплине и затем предлагаются задачи для самостоятельного решения.

Студенты могут использовать методические указания для выполнения расчетно-графических работ, а также контрольных заданий.

Целью изучения дисциплины «Эксплуатация систем и сооружений водоснабжения и водоотведения» является овладение студентами следующими компетенциями:

- знанием правил и технологии монтажа, наладки, испытания и сдачи в эксплуатацию конструкций, инженерных систем и оборудования строительных объектов, образцов продукции, выпускаемой предприятием;
- владением методами опытной проверки оборудования и средств технологического обеспечения;
- владением методами мониторинга и оценки технического состояния и остаточного ресурса строительных объектов, оборудования;
- способностью организовать профилактические осмотры и текущий ремонт, приемку и освоение вводимого оборудования, составлять заявки на оборудование и запасные части, готовить техническую документацию и инструкции по эксплуатации и ремонту оборудования.

В результате изучения дисциплины «Реконструкция систем и сооружений водоснабжения и водоотведения» обучающийся должен:

*Знать:*

– перспективы развития систем водоснабжения и водоотведения, требования к ним, теоретические основы их работы, элементы этих систем, нормы технологических режимов работы систем водоснабжения и водоотведения в нормальных условиях эксплуатации и аварийных ситуациях.

*Уметь:*

– правильно выбирать технологические схемы и режимы для конкретных условий эксплуатации систем ВиВ различного назначения, использовать современные технологии для прочистки, ликвидации засоров и санации трубопроводов систем ВиВ.

*Владеть:*

– современными прогрессивными решениями, методами интенсификации действующих систем, использовать современные технологии, материалы, методы монтажа и эксплуатации;

– методами практического использования современных навигационных систем при розыске существующих сетей ВиВ.

*Иметь представление о:*

– нормативных документах по эксплуатации систем водоснабжения и водоотведения, нормативных сроках выхода на ремонты сооружений и оборудования, нормативах химико-технологического контроля.

# 1. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАНИЙ

## Тема 1. Эксплуатация систем и сооружений водоснабжения

### Занятие 1. Проверка характеристик водопроводных насосных агрегатов в производственных условиях

**Задача.** Эксплуатируемый центробежный насос должен обеспечить расход  $Q=0,1 \text{ м}^3/\text{с}$  и давление на выходе  $p_2=4,7 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$ . Всасывающая труба имеет диаметр  $d=0,3 \text{ м}$  и длину  $L=24 \text{ м}$ , а также фильтр на входе, имеющий местный коэффициент сопротивления  $\xi_{\text{ф}}=5$ . Всасывание воды осуществляется из открытого резервуара (рис. 1). Коэффициент потерь напора на трение  $\lambda=0,02$ , коэффициент местных сопротивлений в повороте  $\xi_{\text{пов}}=0,2$ . Определить высоту всасывания  $H_{\text{вс}}$ .

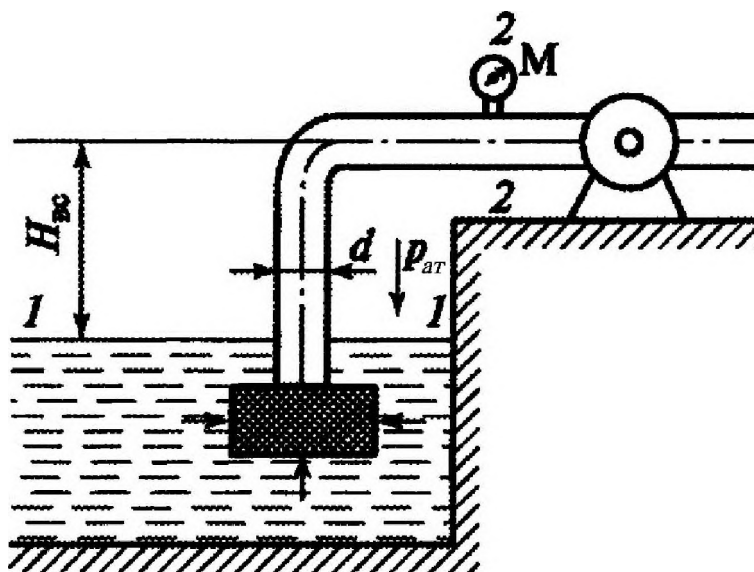


Рис. 1. Схема работы центробежного насоса

*Решение.* На основании уравнения Бернулли, записанного для свободной поверхности воды 1-1 резервуара и сечения 2-2 на входе в насос, имеем

$$H_{\text{вс}} = \frac{p_{\text{ат}}}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} - \left( \alpha + \lambda \frac{L}{d} + \xi_{\text{ф}} + \xi_{\text{пов}} \right) \frac{v^2}{2g}$$

Считая  $\alpha=1$  для турбулентного режима и  $\rho=10^3 \text{ кг/м}^3$ , имеем

$$\begin{aligned} H_{\text{вс}} &= \frac{p_{\text{ат}} - p_2}{\rho g} - \frac{\alpha + \lambda \frac{L}{d} + \xi_{\text{ф}} + \xi_{\text{пов}}}{\frac{\pi^2}{4} d^4 2g} Q^2 = \\ &= \frac{10^5 - 4,7 \cdot 10^4}{10^4} - \frac{1 + 0,02 \frac{24}{0,3} + 5 + 0,2}{\frac{3,14^2}{4} 0,3^4 \cdot 2 \cdot 9,81} 0,1^2 = 4,615 \text{ м.} \end{aligned}$$

## Занятие 2. Эксплуатация водопроводных трубопроводов

**Задача.** Трубопровод имеет параллельное ответвление (рис. 2). Длины участков трубопровода  $l_1=200$  м;  $l_2=200$  м;  $l_3=150$  м;  $l_4=300$  м; диаметры участков  $D_1=D_4=300$  мм;  $D_2=250$  мм;  $D_3=200$  мм.

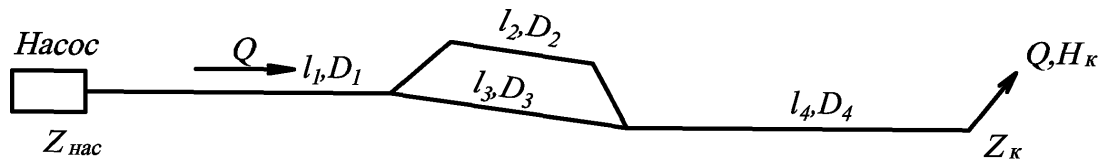


Рис. 2. Схема трубопроводов водопроводной сети

Определить давление, создаваемое насосом для подачи по трубопроводу воды с расходом  $Q = 75$  л/с при отметке оси насоса  $z_{\text{нас}} = 5,0$  м и напоре в конце трубопровода  $H_{\text{к}} = 20$  м, если трубы имеют эквивалентную шероховатость  $\Delta_s=1,0$  мм. Отметка оси трубопровода в конечной точке  $z_{\text{к}} = 8,0$  м.

*Решение.* Определяем расходы на параллельных участках трубопровода, принимая в первом приближении, что режим сопротивления квадратичный, т.е. поправка на квадратичность для второго и третьего участков трубопровода  $\psi_1 = \psi_2 = 1$ . В этом случае

$$Q_2 = Q_3 \frac{K_2}{K_3} \sqrt{\frac{l_3}{l_2}}.$$

Для  $D_2=250$  мм  $K_2^2 = 415352$  л<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>=0,415 м<sup>6</sup>/с<sup>2</sup>, для  $D_3=200$  мм,  $K_3^2 = 127142$  л<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>=0,127 м<sup>6</sup>/с<sup>2</sup>.

Следовательно,  $K_2 = \sqrt{0,415} = 0,644$  м<sup>3</sup>/с,  $K_3 = \sqrt{0,127} = 0,356$  м<sup>3</sup>/с.

Находим расход по второму участку трубопровода через  $Q_3$ :

$$Q_2 = Q_3 \frac{0,644}{0,356} \sqrt{\frac{150}{200}} = 1,57 Q_3.$$

Суммарный расход по трубопроводу

$$Q = Q_2 + Q_3 = 75 \text{ л/с или}$$

$$Q_3 + 1,57 Q_3 = 75. \text{ Отсюда } Q_3 = 29,2 \text{ л/с, } Q_2 = 45,8 \text{ л/с.}$$

Скорость потока на участке 2

$$v_2 = \frac{Q_2 \cdot 4}{\pi D_2^2} = \frac{0,0458 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,25^2} = 0,93 \text{ м/с.}$$

При данной скорости коэффициент на неквадратичность  $\psi_2 = 1,018$ .

Скорость потока на участке 3

$$v_3 = \frac{Q_3 \cdot 4}{\pi D_3^2} = \frac{0,0292 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,2^2} = 0,93 \text{ м/с.}$$



При данной скорости поправка на неквадратичность  $\psi_1=1,018$ .

Так как  $\psi_2=\psi_3$ , то соотношение расходов  $Q_2$  и  $Q_3$  не изменилось, поэтому принимаем ранее полученные расходы на параллельных участках  $Q_2=45,8$  л/с и  $Q_3=29,2$  л/с.

Далее определяем скорости и модули расхода на первом и четвертом участках трубопровода:

$$v_1 = v_4 = \frac{0,075 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,3^2} = 1,06 \text{ м/с.}$$

При данной скорости  $\psi_1=\psi_4=1,014$ . Для  $D_1=D_4=300$  мм,  $K_1^2 = K_4^2 = 1091313 \text{ л}^2/\text{с}^2 = 1,091 \text{ м}^6/\text{с}^2$ .

Определяем напор, создаваемый насосом

$$\begin{aligned} H_{\text{нас}} &= H_{\text{к}} + z_{\text{к}} - z_{\text{нас}} + \frac{\psi_1 Q_1^2 l_1}{K_1^2} + \frac{\psi_2 Q_2^2 l_2}{K_2^2} + \frac{\psi_4 Q_4^2 l_4}{K_4^2} = \\ &= 20 + 8 - 5 + \frac{1,014 \cdot 0,075^2 \cdot 200}{1,091} + \frac{1,018 \cdot 0,0458^2 \cdot 200}{0,415} + \\ &\quad + \frac{1,014 \cdot 0,075^2 \cdot 300}{1,091} = 26,6 \text{ м.} \end{aligned}$$

Давление, развиваемое насосом

$$P_{\text{нас}} = \rho g H_{\text{нас}} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 26,6 = 260900 \text{ Па} \approx 261 \text{ кПа} \approx 0,261 \text{ МПа.}$$

### Занятие 3. Определение параметров работы камеры хлопьеобразования

**Задача.** Рассчитать работу вращательно движущейся лопасти в жидкой среде при эксплуатации камеры хлопьеобразования. Глубина воды в камере  $H=3,6$  м. Ширина каждого из двух отделений камеры  $B_0 = 10,75$  м.

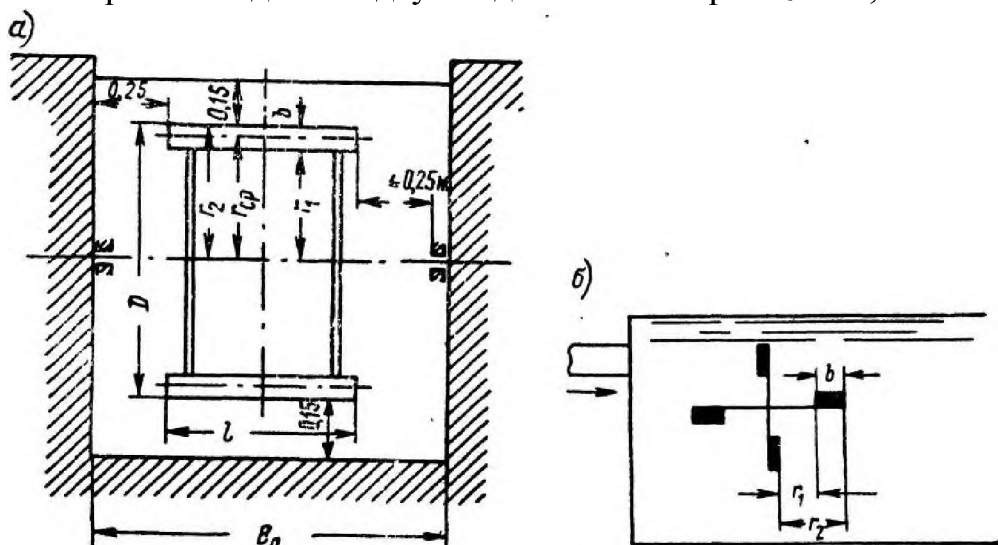


Рис. 3. К расчету лопастной камеры хлопьеобразования:  
а – рама лопастной мешалки; б – схема размещения четырехлопастной вращающейся рамы в камере хлопьеобразования

*Решение.* Диаметр лопастной рамы (рис. 3)  $D = 3,6 - 2 \cdot 0,15 = 3,3$  м. Зазоры между концами лопастей и боковыми стенками камеры принимаем по 0,15 м. Тогда длина лопасти  $l = (10,75 - 5 \cdot 0,15) : 4 = 2,5$  м, а ширина лопасти  $b = 0,1 \cdot 2,5 = 0,25$  м.

Для данного случая  $b:l = 0,25:2,5 = 0,1$ . Следовательно,  $\psi = 1,1$ . Тогда коэффициент  $k$  может быть определен по формуле

$$k = \frac{\psi \gamma}{2g};$$

$$k = \frac{1,1 \cdot 1000}{2 \cdot 9,81} = 56 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4.$$

Работу, производимую силой  $P$ , можно определить по формуле

$$P_{\text{раб}} = \frac{\gamma k l u^3}{4} (r_2^4 - r_1^4) \text{ кгс} \cdot \text{м/сек},$$

Принимаем в данной формуле следующие значения величин:  $\gamma = 4$ ;  $l = 2,5$  м;  $r_1 = 1,4$  м и  $r_2 = 1,65$  м.

Угловая скорость вращения лопасти определяется по формуле

$$u = \frac{v_0}{r_2};$$

$$u = 0,5 : 1,65 = 0,303 \text{ }^1/\text{сек}.$$

Тогда сила  $P$  равна

$$P_{\text{раб}} = \frac{4 \cdot 56 \cdot 2,5 \cdot 0,303^3}{4} (1,65^4 - 1,4^4) = 13,95 \text{ кгс} \cdot \text{м/сек}.$$

Мощность электродвигателя, необходимая для вращения одной лопастной рамы, составит

$$N_{\text{э}} = \frac{P_{\text{раб}}}{102 \eta} = \frac{13,95}{102 \cdot 0,45} = 0,3 \text{ квт}.$$

Применение лопастных камер хлопьеобразования позволяет регулировать интенсивность перемешивания изменением числа оборотов лопастной мешалки.

**Занятие 4.** Проверка по формулам Кэмпа правильности выбора размеров и расчетных параметров камеры хлопьеобразования

**Задача.** Проверить по формулам Кэмпа правильность выбранных размеров и расчетных параметров камеры согласно данным предыдущей задачи.

*Решение.*

*1-я проверка* – соответствие площади лопастей мешалки принятой площади поперечного сечения камеры.

Площадь поперечного сечения камеры, состоящей из двух отделений,

$$F = 2B_0H = 2 \cdot 10,75 \cdot 3,6 = 77,4 \text{ м}^2.$$

Площадь лопастей, находящихся в поперечном сечении обоих отделений камеры (с четырьмя рамами),

$$f_{\text{л}} = 4lb \cdot 4 = 4 \cdot 2,5 \cdot 0,25 \cdot 4 = 10 \text{ м}^2.$$

Отношение площади лопастей к площади поперечного сечения камеры:  $(10:77,4) \cdot 100 \approx 13\% < 15\text{-}20\%$ .

2-я проверка – расход мощности для вращения лопастных рам. Относительная, скорость движения лопасти с радиусом вращения  $r_2$  по формуле

$$v = \frac{l \cdot 2 \pi r_2 \alpha}{60}.$$

$$v = \frac{2,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 1,65 \cdot 0,75}{60} \approx 0,33 \text{ м/сек.}$$

В данном случае  $l:b = 2,5:0,25 = 10$  и, следовательно,  $\varphi = 1,29$ . Тогда расход мощности для вращения четырех лопастных рам, размещенных на одной горизонтальной оси, по формуле Кэмпса составит

$$N = 51 \varphi f_{\text{л}} v^3$$

$N = 51 \cdot 1,29 \cdot 10 \cdot 0,33^3 \approx 23,9 \text{ кгс} \cdot \text{м/сек} \approx 0,24 \text{ кВт}$ , т.е. менее 0,3 кВт, принятых по расчету.

Так как одновременно действуют два двигателя, то удельный расход мощности на  $1 \text{ м}^3$  емкости камеры хлопьеобразования

$$N_{\text{уд}} = \frac{2N}{LB_0H} = \frac{2 \cdot 23,9}{10,8 \cdot 10,75 \cdot 3,6} \approx 0,115 \text{ кгс} \cdot \text{м/сек.}$$

3-я проверка – критерий работы камер с лопастными мешалками по предложенной Кэмпом формуле

$$G = 10 \sqrt{\frac{N_{\text{уд}}}{\mu}},$$

$$G = 10 \sqrt{\frac{0,115}{0,0131}} = 29,6 \text{ сек}^{-1}$$

Безразмерный критерий выразится величиной

$$GT = 29,6 \cdot 30 \cdot 60 = 53280.$$

Безразмерный критерий  $GT$  при продолжительности пребывания воды в камере 30 мин должен быть в пределах 40000–2 100 000 при температуре воды  $10^\circ\text{C}$ .

Следовательно, произведенный выше расчет вполне отвечает рекомендуемым значениям критерия, предложенного Кэмпом.

## Занятие 5. Основы расчета надежности систем и сооружений водоснабжения

**Задача.** Определить вероятность безотказной работы  $P(t)$  системы водоснабжения через 100 ч и через 1 год. Интенсивность отказов  $\lambda_c = 5 \cdot 10^{-4}$ , ч<sup>-1</sup>.

Решение:

а)  $t = 100$  ч;  $\lambda t = 5 \cdot 10^{-4} \cdot 100 = 5 \cdot 10^{-2} \ll 1$ ; применяем упрощенную формулу:

$$P(100) = 1 - \lambda t = 1 - 5/100 = 0,95, \text{ или } 95 \%;$$

б)  $t = 1$  год ( $\sim 8000$  ч);  $\lambda t = 5 \cdot 10^{-4} \cdot 8000 = 5 \cdot 10^{-2} \gg 1$ ; упрощенная формула не может быть применена:

$$P(8000) = e^{-\lambda t} = e^{-(5 \cdot 10^{-4} \cdot 8 \cdot 10^3)} = 1/54 = 0,0180, \text{ или } 1,8\%.$$

## Тема 2. Эксплуатация систем и сооружений водоотведения

### Занятие 6. Проверка характеристик канализационных насосных агрегатов в производственных условиях

**Задача.** Определить? какова потеря энергии за сутки эксплуатации канализационного насосного агрегата при регулировании задвижкой насоса, подающего  $Q_R = 0,8$  м<sup>3</sup>/с, при  $\eta_R = 0,73$ , потери напора в задвижке  $h_d = 1,5$  м.

Решение: Теряемая при регулировании мощность

$$\Delta N = 9,81 \cdot Q_R \cdot h_d / \eta_R,$$

где  $h_d$  – напор, теряемый в задвижке;

$\eta_R$  – КПД насоса, соответствующий подаче  $Q_R$ .

$$\Delta N = 9,81 \cdot 0,8 \cdot 1,5 / 0,73 = 16,1 \text{ кВт}.$$

За сутки потеря напора энергии составит  $16,1 \cdot 24 = 386$  кВт·ч.

### Занятие 7. Оценка технологических параметров работы аэротенка в период эксплуатации.

**Задача.** Рассчитать технологические параметры аэротенка-вытеснителя с регенерацией активного ила, применяемого для очистки городских сточных вод, если известно:

- расчетный расход сточных вод  $q_w = 2500$  м<sup>3</sup>/ч;
- концентрация поступающих органических загрязнений в аэротенк  $L_{en} = 370$  мгО/л;
- концентрация органических загрязнений в очищенных стоках  $L_{ex} = 15$  мгО/л;
- доза ила в зоне аэрации  $a_i = 3$  г/л;
- иловый индекс активного ила  $J_i = 100$  см<sup>3</sup>/г;
- среднегодовая температура сточных вод  $T_w = 15^\circ\text{C}$ ;

- средняя концентрация кислорода в аэротенке  $C_0=2$  мг/л.

Решение:

1. Степень рециркуляции активного ила определяется по формуле 52 СНиП 2.04.03-85

$$R_i = \frac{a_i}{\frac{1000}{J_i} - a_i} = \frac{3}{\frac{1000}{100} - 3} = 0,43.$$

2. БПК<sub>полн</sub> смеси сточных вод с потоком возвратного активного ила определяется по формуле 51 СНиП 2.04.03-85

$$L_{mix} = \frac{L_{en} + L_{ex} \cdot R_i}{1 + R_i} = \frac{370 + 15 \cdot 0,43}{1 + 0,43} = 263 \text{ мгО/л.}$$

3. Продолжительность обработки воды в аэротенке определяется по формуле 56 СНиП 2.04.03-85

$$t_{at} = \frac{2,5}{\sqrt{a_i}} lq \frac{L_{mix}}{L_{ex}} = \frac{2,5}{\sqrt{3}} lq \frac{263}{15} = 1,8 \text{ ч.}$$

4. Доза ила в регенераторе определяется по формуле 55 СНиП 2.04.03-85

$$a_r = a_i \left( \frac{1}{2R_i} + 1 \right) = 3 \left( \frac{1}{2 \cdot 0,43} + 1 \right) = 6,49 \text{ г/л.}$$

5. Удельная скорость окисления органических веществ в регенераторе определяется по формуле 49 СНиП 2.04.03-85

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{\max} \frac{L_{ex} \cdot C_0}{L_{ex} \cdot C_0 + K_l \cdot C_0 + K_0 \cdot L_{ex}} \cdot \frac{1}{1 + \varphi \cdot a_r} = \\ &= 85 \frac{15 \cdot 2}{15 \cdot 2 + 33 \cdot 2 + 0,625 \cdot 15} \cdot \frac{1}{1 + 0,07 \cdot 6,49} = \\ &= 16,6 \text{ мг БПК}_{\text{полн}} / (\text{г} \cdot \text{ч}), \end{aligned}$$

где  $\rho_{\max}$ ,  $K_l$ ,  $K_0$ ,  $\varphi$  – параметры, принимаемые по табл. 40 СНиП 2.04.03-85 для городских стоков.

6. Продолжительность окисления органических веществ определяется по формуле 54 СНиП 2.04.03-85

$$t_0 = \frac{L_{en} - L_{ex}}{R_i \cdot a_r (1 - S) \rho} = \frac{370 - 15}{0,43 \cdot 6,49 (1 - 0,3) \cdot 16,6} = 10,95 \text{ ч,}$$

где  $S=0,3$  – зольность ила, принимаемая по табл. 40 СНиП 2.04.03-85.

7. Продолжительность регенерации активного ила определяется по формуле 57 СНиП 2.04.03-85

$$t_r = t_0 - t_{at} = 10,95 - 1,8 = 9,15 \text{ ч.}$$

8. Объем аэротенков определяется по формуле 58 СНиП 2.04.03-85

$$W_{at} = t_{at}(1 + R_i)q_w = 1,8(1 + 0,43) \cdot 2500 = 6435 \text{ м}^3.$$

9. Объем регенераторов определяется по формуле 59 СНиП 2.04.03-85

$$W_r = t_r \cdot R_i \cdot q_w = 9,15 \cdot 0,43 \cdot 2500 = 9836 \text{ м}^3.$$

10. Общий объем аэротенков-регенераторов:

$$W = W_{at} + W_r = 6435 + 9836 = 16271 \text{ м}^3.$$

## Занятие 8. Оценка эксплуатационных данных работы метантенка

**Задача.** Оценить эксплуатационные данные о работе метантенков, если доза загрузки равна 11%, влажность загружаемой смеси осадка и ила – 95,5%, зольность – 28%, влажность сброженного осадка – 97,1%, зольность сброженного осадка – 42%. Температура брожения 51,5 °С.

Соотношение загружаемого осадка и ила по беззольному веществу равно 1:1. Газы брожения имеют состав  $\text{CH}_4$ –65 %,  $\text{H}_2$ –0 %,  $\text{CO}_2$ –34 % и  $\text{N}$ –1 %. Выход газа составляет 13 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. В иловой жидкости среднее содержание низших жирных кислот (НЖК) равняется 7,5 мг-экв/л и щелочности – 91 мг-экв/л. Концентрация азота аммонийных солей в иловой воде составляет 845 мг/л.

*Решение.* Метантенки работают в термофильном режиме сбраживания при температуре бродящей массы 51,5 °С, весьма близкой к оптимальной (53 °С). Термофильно сброженные осадки полностью обезврежены в санитарном отношении. Сооружения эксплуатируются в условиях очень низкой для термофильного режима дозы загрузки, составляющей всего 11%, тогда как по нормам проектирования при исходной влажности осадка 95,5 % она может быть принята равной 19 %.

Определим глубину процесса распада органического вещества, для чего выполним ряд предварительных расчетов

Доза  $D_{без}$  составляет

$$D_{без} = 0,11 \cdot 45 (1 - 0,28) = 3,56 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут}).$$

В сброженном осадке осталось беззольного вещества:

$$D_{без} = 0,11 \cdot 29,0,58 = 1,85 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут}).$$

Распад по беззольному веществу:

$$P_{без} = (D_{без} - D_{сб}) 100/D_{без} = (3,56 - 1,85) 100/3,56 = 48,1\% .$$

Найдем распад по выходу газа. Плотность газов брожения, найденная по справочнику и подсчитанная как среднеарифметическая величина, составляет 1,15 кг/м<sup>3</sup>. При выходе газов 13 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> загружаемого осадка их вес будет: 13·1,15=14,9 кг/м<sup>3</sup> или в расчете на 1 м<sup>3</sup> объема метантенка (что нужно для получения сравнимых величин) 14,9·0,11= 1,64 кг/(м<sup>3</sup>·сут). Распад по газу  $P_r = 1,64 \cdot 100/3,56 = 46,2\%$ .

Предел сбраживания загружаемой смеси (учитывается по выходу газа) при соотношении осадка и ила по беззольному веществу 1:1,  $a_{см} = (53,6 \cdot 1 + 50,5 \cdot 1) / 2 = 52,1 \%$ .

Степень (или глубина) сбраживания осадков, учтенная по выходу газов,  $46,2 \cdot 100 / 52,1 = 89 \%$ .

Из полученных результатов можно сделать следующий вывод. Метантенки работают с низкими дозами загрузки как по объему, так и по беззольному веществу. Вследствие этого получены высокие результаты по степени обработки осадков. Распад по беззольному веществу несколько превышает величину  $P_r$ , что позволяет говорить о практически закончившемся выделении газа (речь идет о таком газовыделении, которое проходит со скоростями, приемлемыми в техническом отношении). Глубина сбраживания осадка составляет 89%, т.е. до теоретически возможного выхода остается недополученным лишь 11 % количества газа. Состав газов брожения и иловой воды свидетельствует о стабильно идущем процессе брожения.

Интересно сравнить также результаты, полученные в процессе эксплуатации, с данными СНиП 2.04.03–85. Согласно этим СНиП, при влажности сырых осадков 95,5 % и  $K_r = 0,27$  ожидаемый распад беззольного вещества, учитываемый по выходу газа, должен составить:

$$U = P_r - (a_{см} - K_r D) / 100 = 52,1 \cdot 0,27 \cdot 11 = 49,03\%.$$

В нашем случае в натуре мы получили  $P_r = 46,2 \%$ , т.е. результат, близкий к тому, который по требованиям СНиП следовало бы получить при  $D = 11 \%$ . Это означает, что при той же степени сбраживания метантенки могли бы обработать осадка больше, чем обработано, т.е. метантенки заметно недогружены.

## Занятие 9. Оценка эксплуатационных данных работы вакуум-фильтра

**Задача.** Проанализировать данные о работе вакуум-фильтра БОУ-40, если за 2500 ч его эксплуатации на промывку было подано 80 тыс. м<sup>3</sup> осадков влажностью 96,8 %, получено после промывки 42 тыс. м<sup>3</sup> осадков влажностью 95 % и получено обезвоженного осадка 12,65 тыс. м<sup>3</sup> влажностью 80 %. Используются реагенты: хлорное железо с дозой 4 % и гашеная известь с дозой 25 % по товарным продуктам. Удельный расход промывной воды составил 3 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

*Решение.* Выполним предварительные расчеты. Сухого вещества подано на промывку  $80 \cdot 32 = 2560$  т. Получено сухого вещества после промывки и уплотнения  $42 \cdot 50 = 2100$  т. Потеря сухого вещества осадка со сливной водой составила  $2560 - 2100 = 460$  т.

В уплотнитель было подано смеси по объему (при удельном расходе промывной воды 4 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>)  $80 \cdot 4 = 320$  тыс. м<sup>3</sup>. Если удалено в виде осадка 42 тыс. м<sup>3</sup>, то объем сливной воды составил  $320 - 42 = 278$  тыс. м<sup>3</sup>. Концентрация взвешенных веществ в сливной воде  $460 / 278 = 1654$  т/тыс. м<sup>3</sup> = 1654 мг/л.

По сухому веществу подано реагентов хлорного железа  $2100 \cdot 0,04 = 84$  т; гашеной извести  $2100 \cdot 0,25 = 525$  т; всего реагентов  $84 + 525 = 609$  т.

Значительная часть добавляемых реагентов оказывается в воде в нерастворенном виде. Это – образующийся гидроксид железа, практически нерастворимый в воде, до 80 % добавляемой извести, в силу малой ее растворимости, и до 5–10 % инородных веществ. Учет всех этих компонентов прямым способом может быть выполнен лишь ориентировочно, но даже такой подсчет показывает, что к сухому веществу осадков по массе добавляется реагентов до 70–80 %. Более определенный ответ на этот вопрос можно получить иным путем, при условии достаточно точно налаженного учета объемов осадков и проведения лабораторного контроля качества осадков. Осадок влажностью 80 % еще не рассыпается, он имеет полугустую консистенцию; для такого осадка можно рассчитать количество сухого вещества исходя из данных по объему и влажности осадка.

Получено сухого вещества после фильтрации  $12,65 \cdot 200 = 2530$  т. Поскольку в осадке сухого вещества было 2100 т, то дополнительные 430 т могут быть отнесены за счет реагентов. К сожалению, в отчетных данных не приведены показатели зольности осадков до и после фильтрации. Столь значительная добавка реагентов должна была повысить зольность осадка на 3–5 %.

Производительность вакуум-фильтра по сухому веществу при площади поверхности фильтра  $40 \text{ м}^2$  с учетом реагентов составит:  $2530000 / (2500 - 40) = 25,3 \text{ кг} / (\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ , а без учета реагентов –  $21 \text{ кг} / (\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ .

Оценивая полученные результаты, можно отметить, что при вакуум-фильтрации получен осадок удовлетворительного качества по влажности. Производительность аппарата находится в пределах рекомендуемых норм. На обработку осадков затрачено большое количество реагентов, в общей сложности порядка 30 % по массе от массы сухого вещества осадков. Велика потеря сухого вещества осадков (до 20 %) при их промывке и уплотнении. Сливная вода из илоуплотнителя имеет очень высокую концентрацию загрязнений и должна быть в силу этого дополнительно обработана. Добавка этой воды в первичные отстойники заметно отражается на работе последних.

При фильтрации образуется большой объем фильтрата. В нашем примере объем фильтрата составляет более 31 тыс.  $\text{м}^3$  с учетом воды растворов реагентов. Поскольку фильтрат направляется в уплотнитель, то общее количество сливной воды будет больше, чем это определено первичным расчетом. При фильтрации изменяются физико-химические свойства осадков, в них заметно увеличивается доля зольных элементов.



## 2. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

### Тема 1. Реконструкция систем и сооружений водоотведения

#### Занятие 1. Проверка характеристик водопроводных насосных агрегатов в производственных условиях

**Задача.** Центробежный насос (рис. 4) подает воду с температурой  $t=15^{\circ}\text{C}$  в бак по новой стальной бесшовной трубе диаметром  $d=125$  мм и длиной  $l_n=27$  м при геометрической высоте нагнетания  $h_n=20$  м. Длина всасывающего трубопровода  $l_в=5$  м при геометрической высоте всасывания  $h_в=3$  м. Насос развивает напор  $H=27$  м. Коэффициенты местных сопротивлений в поворотах  $\zeta_{пов}=0,25$ , в приемном клапане  $\zeta_{пр.кл}=6$ . Определить подачу насоса  $Q$ .

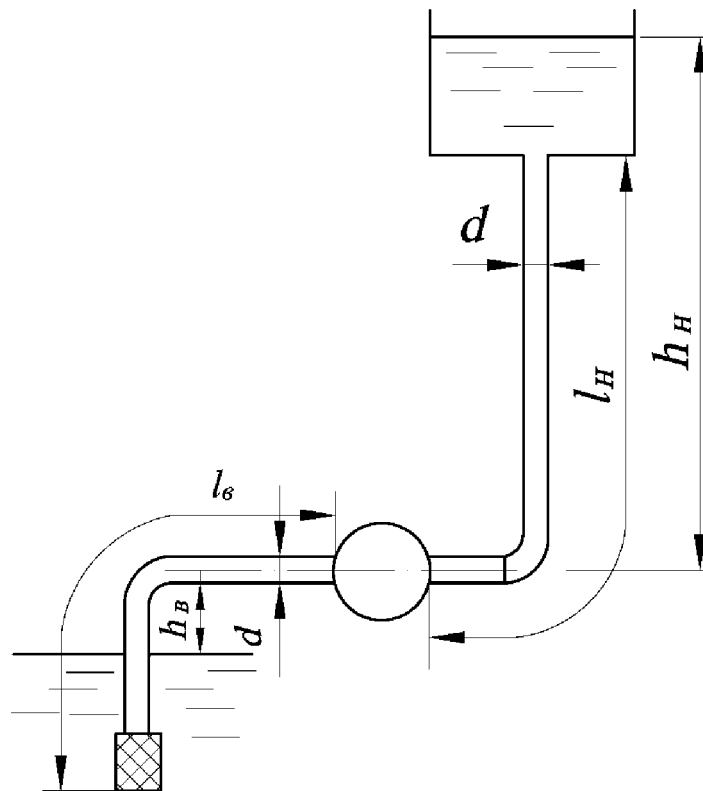


Рис. 4. Схема работы центробежного насоса

### Занятие 2. Эксплуатация водопроводных трубопроводов

**Задача.** Вода из водонапорной башни высотой  $H = 15$  м подается по асбестоцементному горизонтальному трубопроводу диаметром условного прохода  $D = 150$  мм на расстояние  $l = 1,5$  км. Определить: а) на какую высоту  $h$  в конце трубопровода будет подаваться вода при расходе  $Q = 16$  л/с; б) какой расход  $Q$  будет в конце трубопровода на высоте  $h = 7$  м.

### Занятие 3. Определение параметров работы камеры хлопьеобразования

**Задача.** Рассчитать работу вращательно движущейся лопасти в жидкой среде при эксплуатации камеры хлопьеобразования (рис. 5). Глубина воды в камере  $H=5$  м. Ширина каждого из двух отделений камеры  $B_0=12$  м.

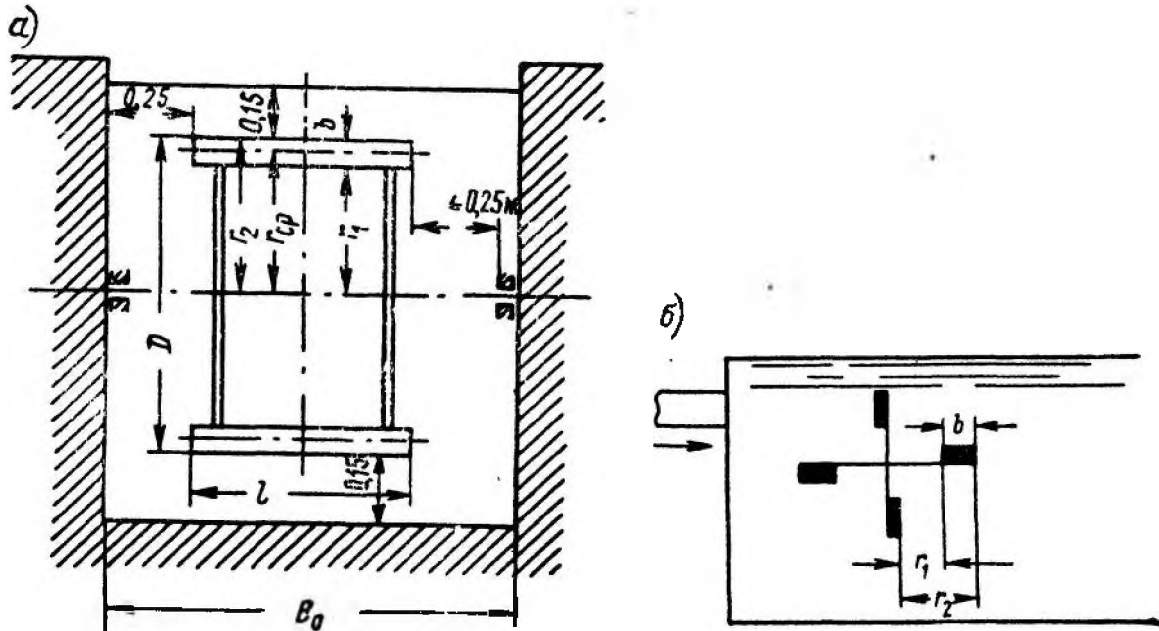


Рис. 5. К расчету лопастной камеры хлопьеобразования:  
а – рама лопастной мешалки; б – схема размещения четырехлопастной вращающейся рамы в камере хлопьеобразования

### Занятие 4. Проверка по формулам Кэмпа правильности выбора размеров и расчетных параметров камеры хлопьеобразования

**Задача.** Проверить по формулам Кэмпа правильность выбранных размеров и расчетных параметров камеры согласно данным предыдущей задачи.

### Занятие 5. Основы расчета надежности систем и сооружений водоснабжения.

**Задача.** Определить суммарное значение интенсивности сказов  $\lambda_c$  системы водоснабжения (рис. 6) и вероятности безотказной работы через 100, 1000, 2000, 4000, 8000 ч непрерывной работы.

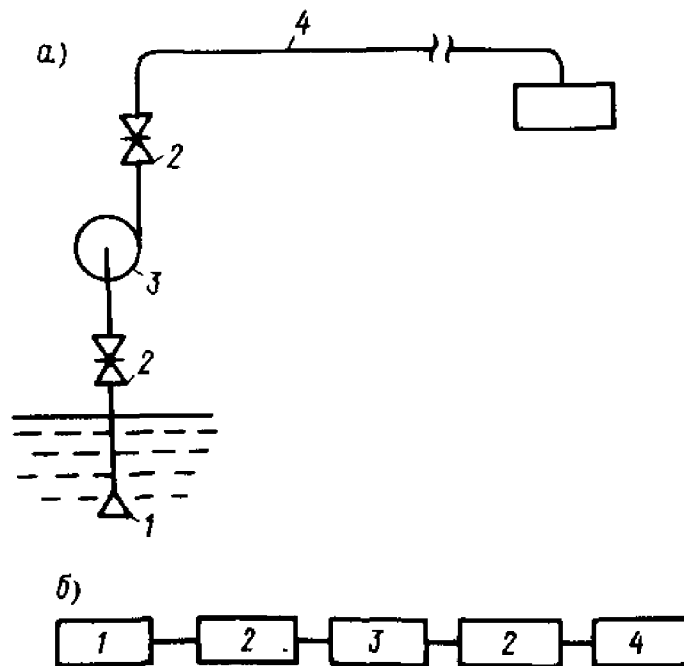


Рис. 6 Расчетная схема по определению  $P(t)$ :

$a$  – принципиальная схема системы;  $b$  – структурная схема системы;  
 $1$  – приемный клапан;  $2$  – задвижки,  $d = 250$  мм;  $3$  – насос;  $4$  – водовод,  $L = 500$  м

## Тема 2. Эксплуатация систем и сооружений водоотведения

### Занятие 6. Проверка характеристик канализационных насосных агрегатов в производственных условиях

**Задача.** Определить, с какой мощностью  $N$  и с какой частотой вращения  $n$  работает установленный электрический двигатель, если производительность насоса  $Q = 300$  м<sup>3</sup>/ч при напоре  $H = 50$  м вод.ст.; частота вращения  $n = 900$  об/мин; КПД насосной установки с учетом всех потерь  $\eta = 0,65$ .

### Занятие 7. Оценка технологических параметров работы аэротенка в период эксплуатации

**Задача.** Рассчитать технологические параметры аэротенка-вытеснителя без регенерации активного ила, применяемого для очистки городских сточных вод, если известно:

- расчетный расход сточных вод  $q_w = 1500$  м<sup>3</sup>/ч;
- концентрация поступающих органических загрязнений в аэротенк  $L_{en} = 150$  мгО/л;
- концентрация органических загрязнений в очищенных стоках  $L_{ex} = 15$  мгО/л;
- доза ила в аэротенке  $a_i = 2$  г/л;
- иловый индекс активного ила  $J_i = 100$  см<sup>3</sup>/г;
- среднегодовая температура сточных вод  $T_w = 14$  °С;
- средняя концентрация кислорода в аэротенке  $C_0 = 2$  мг/л.

## Занятие 8. Оценка эксплуатационных данных работы метантенка

**Задача.** Оценить работу метантенков, если анализ иловой жидкости дал результаты по содержанию жирных кислот в одном метантенке 33 мг-экв/л и щелочности 42 мг-экв/л, а в другом – соответственно 8 и 92 мг-экв/л. Газы брожения в первом метантенке имеют состав  $\text{CH}_4$  – 25 %,  $\text{H}_2$  – 29 %,  $\text{CO}_2$  – 45%,  $\text{N}$  – 1 %, а во втором – соответственно 65, 1, 33 и 1 %.

## Занятие 9. Оценка эксплуатационных данных работы вакуум-фильтра

**Задача.** Проанализировать данные о работе вакуум-фильтра БГН-50, если за 2000 ч его эксплуатации на промывку было подано 60 тыс.  $\text{м}^3$  осадков влажностью 90,3 %, получено после промывки 42 тыс.  $\text{м}^3$  осадков влажностью 89 % и получено обезвоженного осадка 11,37 тыс.  $\text{м}^3$  влажностью 75 %. Используются реагенты: хлорное железо с дозой 5 % и гашеная известь с дозой 20 % по товарным продуктам. Удельный расход промывной воды составил 4  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Павлинова, И.И. Водоснабжение и водоотведение: учебник для бакалавров [Текст] / И.И. Павлинова, В.И. Баженов, И.Г. Губий. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2015.
2. Абрамов, Н.Н. Водоснабжение [Текст]: учебник для вузов / Н.Н. Абрамов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Интеграл, 2014.
3. Орлов, В.А. Водоснабжение [Текст]: учебник / В.А. Орлов, Л.А. Квитка. – М.: ИНФРА-М, 2015.
4. Фрог, Б.Н. Водоподготовка [Текст]: учебник для вузов / Б.Н. Фрог, А.Г. Первов. – М.: АСВ, 2014.
5. Воронов, Ю.В. Водоотведение [Текст]: учебное издание / Ю.В. Воронов, Е.В. Алексеев, Е.А. Пугачев. – М.: АСВ, 2014.
6. Жмаков Г.Н. Эксплуатация оборудования и систем водоснабжения и водоотведения [Текст] / Г.Н. Жмаков. – М.: ИНФРА, 2005.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ.....                                   | 3  |
| 1. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАНИЙ .....   | 5  |
| 2. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ ..... | 15 |
| РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....                      | 19 |

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В. И. ВЕРНАДСКОГО»

АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ

ФАКУЛЬТЕТ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭНЕРГЕТИКИ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ СИСТЕМ  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ (ВТОРАЯ ЧАСТЬ)

**Методические указания**

по выполнению практических занятий

направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства,  
направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы  
охраны водных ресурсов»

Симферополь

2019

Технологические процессы и оборудование систем водоснабжения и водоотведения (вторая часть): Методические указания к практическим занятиям для обучающихся направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов». – Симферополь, 2019. – 33 с.

Методические указания предназначены для обучающихся по направлению подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов». В методических указаниях изложен порядок проведения лабораторных занятий по отдельным темам. Рассмотрены вопросы контроля, управления и оптимизации операций в системах ВиВ, технология управления замкнутым контуром.

Составители: Николенко И.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники.

Утверждены на заседании учебно-методической комиссии факультета водных ресурсов и энергетики от 03 сентября 2019 года, протокол № 1.

Одобрены на заседании кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники от 22 мая 2019 года, протокол № 21.



# Содержание

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Практическое занятие №1</b>  | <b>3</b>  |
| 1.1      | Учебное оборудование  | 3         |
| 1.2      | Важные символы P&I используемые для лабораторной установки «Управление водными ресурсами» | 4         |
| 1.3      | Результаты учебной деятельности после выполнения упражнений                               | 6         |
| 1.4      | Введение в модуль изучения “Контроль, управление и оптимизацию операций”                  | 7         |
| 1.4.1    | Контроль давления   | 7         |
| 1.4.2    | Контроль расхода (подачи)   | 7         |
| 1.4.3    | Контроль уровня заполнения  | 8         |
| <b>2</b> | <b>Практическое занятие №2</b>  | <b>9</b>  |
| 2.1      | Основные принципы   | 9         |
| 2.1.1    | Регуляторы дискретного и непрерывного действия  | 10        |
| 2.1.2    | Интегральная система: Резервуар без отбора  | 10        |
| 2.1.3    | Система PT1: Резервуар с отбором  | 11        |
| 2.2      | Упражнения  | 12        |
| 2.2.1    | Управление уровнем заполнения с применением двухступенчатого регулятора                   | 12        |
| 2.2.2    | Управление уровнем заполнения с применением непрерывного регулятора                       | 17        |
| 2.2.3    | Управление подачей с применением пропорционально-интегрального регулятора                 | 26        |
| <b>3</b> | <b>Практическое занятие №3</b>  | <b>31</b> |
| 3.1      | Основные принципы   | 31        |
| 3.2      | Упражнения  | 31        |
| 3.2.1    | Объемное регулирование подачи   | 33        |
| 3.2.2    | Управление отбором  | 34        |

## Введение

Лабораторная установка «Управление водными ресурсами» предназначена для моделирования всего цикла водопользования системы водного хозяйства. Под системой подразумевают комплекс инженерных сооружений, предназначенных для забора воды из подземных источников, родников, поверхностных вод и включает этапы очистки и последующего хранения. Также охватывает этапы подачи воды потребителю, использование, и отвод сточных вод. Воспроизведение процесса транспортировки сточных вод совместно с дождевыми стоками на станцию очистки.

После очистных сооружений очищенные сточные воды сбрасываются в поверхностные воды, как правило, реки. Прямое повторное использование сточных вод не распространено, так как они, после очистки, поступают в природные водоемы, которые является источником водоснабжения. Круговорот воды в EDS® «Управление водными ресурсами» завершается путем повторного использования очищенных сточных вод в качестве ввода воды в систему.

Учебное оборудование EDS® «Управление водными ресурсами» ярко моделирует этот “искусственный” водный цикл со своими четырьмя системами:

1. Очистка воды
2. Водоснабжение
3. Водоотведение
4. Очистка сточных вод

Процессы, такие как перекачка, хранение, флокуляция, дезинфекция и распределение воды могут быть изучены посредством практических упражнений. После добавления модели физического загрязнения мы наблюдаем за потоком сточных вод и рассматриваем процессы, такие как выпадение осадка, аэрация и рециркуляция активного ила.

Подробная документация с теоретическим вводом дополнительно способствует успеху обучения. Четыре из технических руководств соответствуют непосредственно системам, тогда как два общих технических руководств являются дополнительным введением в технологию управления с обратной связью и теорию эффективности использования энергии.

Каждая система может использоваться в качестве автономного учебного оборудования для отдельного модуля обучения. Учебное оборудование может быть изменено индивидуально путем переподключения трубопроводов и датчиков. Если эти четыре системы соединены, они формируют объединенное учебное оборудование, которое обеспечивает все процессы и упражнения, описанные в технических руководства. Используя системы вместе, это позволяет студентам видеть, как влияют отдельные этапы процессов друг на друга.

Как и в реальном мире, рассматриваемые процессы взаимодействуют. Очистная станция сточных вод, например, должна обработать приток и концентрацию загрязнений в сточных водах, поступающих на канализационную очистную станцию. Отдельные системы учебного оборудования соединены трубопроводами, которые транспортируют воду. При этом схема управления выполнена для каждой системы отдельно. Таким образом, EDS® «Управление водными ресурсами» позволяет студентам отработать и моделировать ситуации, используя различные параметры настройки и системные состояния. Эксперимент может быть выполнен, без дополнительных затрат и потерь, что не возможно в реальных условиях эксплуатации.

## Практическое занятие №1

### 1.1 Учебное лабораторное оборудование

Эти четыре системы были разработаны для использования в модуле «Контроль, управления и оптимизации операций».

В обучающем модуле “Контроль, управление и оптимизация операций” рассматриваются следующие вопросы: управление потоком, аэрация и регулятор уровня наполнения.



Система очистки воды



Система водоснабжения



Система водоотведения



Система очистки сточных вод

Таблица какие системы EDS® охвачены при выполнении данных лабораторных работ. Используемые системы отмечены с “X”.

| Связь упражнений с системами EDS® «Управление водными ресурсами»             |  | W-PUR | W-SUP | WW-TRA | WW-TRE |
|--|--|-------|-------|--------|--------|
| <b>2. Технология управления замкнутым контуром: Насос</b>                    |  |       |       |        |        |
| 2.2.1  | Управление уровнем заполнения при использовании двухступенчатого регулятора      |       | X     |        |        |
| 2.2.2  | Управление уровнем заполнения при использовании непрерывного регулятора          |       | X     |        |        |
| 2.2.3  | Управление потоком при использовании пропорционально-интегральный регулятор      | X     |       | X      | X      |
| <b>3. Технология управления замкнутым контуром: Пропорциональный клапан.</b> |  |       |       |        |        |
| 3.2.1  | Объемное регулирование подачи  |       |       | X      |        |
| 3.2.2  | Управление сливом  |       |       | X      |        |
| <b>4. Технология управления замкнутым контуром: Аэрация</b>                  |  |       |       |        |        |
| 4.2.1  | Управление концентрацией кислорода при использовании двухступенчатого регулятора |       |       |        | X      |
| 4.2.2  | Управление концентрацией кислорода при использовании непрерывного регулятора     |       |       |        | X      |

W-PUR: Система Очистки Воды

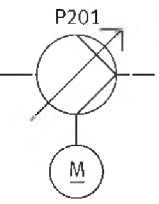


W-SUP: Системы Водоснабжения







WW-TRA: Система Водоотведения

WW-TRE: Система Очистки Сточных Вод

### 1.2 Важнейшие P&I символы, используемые для EDS® «Управление водными ресурсами»

Схема трубопроводов и арматура (P&I) - показывает функциональные назначения и параметры элементов. P&I схема содержит различные символы для датчиков, клапанов, приводов, двигателей, насосов, баков и труб. P&I символы, используемые в этом техническом руководстве основаны на собственной символике 62424, соответствующей EN 10628. Упрощенная форма схем легко читается и используется.

| Символ  | Обозначение                      |
|---|----------------------------------|
|  | Насос с электрическим двигателем |
|  | Резервуар (отстойник)            |
|  | Фильтр                           |

|   |   |
|---|---|
|  | Трубопровод   |
|  | Соединение трубопроводов  |
|  | Привод (общее обозначение)  |
|  | Ручной привод   |
|  | Ручной вентиль  |
|  | <p>Датчик</p> <p><b>Вверху:</b> FIC - обозначает датчик потока (F), который показывает текущее значение (I) и может быть использовано для управления замкнутого потока (C)</p> <p>Внизу: нумерация датчика</p> <p>Дальнейшее объяснение символов в верхней части символ: см. таблицу ниже</p> |

Символы – примеры для систем EDS®

| Первый символ |             | Второй символ |                     |
|---------------|-------------|---------------|---------------------|
| <b>F</b>      | Поток       | A             | Сигнализация        |
| <b>L</b>      | Уровень     | C             | Контроль            |
| <b>P</b>      | Давление    | I             | Мгновенное значение |
| <b>Q</b>      | Качество    | O             | Оптический сигнал   |
| <b>T</b>      | Температура | R             | Регистрация         |
| <b>D</b>      | Разница     | +/-           | Порог срабатывания  |

Обозначение датчиков

## 1.2 Результаты учебной деятельности после выполнения лабораторных работ

С упражнением 2.2.1 “Управление, уровнем наполнения, используя двухступенчатый регулятор” студент может:

- различать линейные и не линейные системные характеристики
- демонстрировать линейные и не линейные системные характеристики, используя EDS® «Управление водными ресурсами»
- управлять уровнем наполнения резервуара с двухступенчатым регулятором при помощи программного обеспечения FluidLab® «Управление водными ресурсами»
- описать параметры настройки/характеристики регулятора, используя EDS® «Управление водными ресурсами»
- объяснить влияние на систему водоснабжения переменного водопотребления.

С упражнением 2.2.2 “Управление, уровнем наполнения, используя непрерывный регулятор” студент может:

- управлять уровнем наполнения с непрерывным регулятором при помощи программного обеспечения FluidLab® «Управление водными ресурсами»

- описать характеристики различных непрерывных регуляторов
- объяснить характеристики в схеме управления
- описать влияние интегрального времени на отклонения в системе
- объяснить влияние на отклонения в системе характеристики времени срабатывания
- исследовать влияние параметров настройки управления на потребление энергии.

С упражнением 2.2.3 “Управление потоком, используя пропорционально-интегральный регулятор” студент:

- регулировать расход при помощи программного обеспечения FluidLab® «Управление водными ресурсами»
- описать параметры настройки регулятора, влияние характеристики на отклонения в системе
- исследовать эффективность потребления энергии для параметров настройки управления.

С упражнением 3.2.1 “Общее управление потоком” студент может:

- скорректировать подачу при помощи различных параметров настройки в программном обеспечении FluidLab® «Управление водными ресурсами», чтобы управлять пропорциональным клапаном.

С упражнением 3.2.2 “Управление сливом” студент может:

- найти оптимальные настройки для управления сливом, используя программное обеспечение FluidLab® «Управление водными ресурсами», чтобы управлять пропорциональным клапаном.

С упражнением 4.2.1 “Управление, концентрацией кислорода, используя двухступенчатый регулятор” и упражнением 4.2.2, «Управление, концентрацией кислорода, используя непрерывный регулятор” студент может:

- оценить лучшую стратегию управления процессом аэрации.

### **1.3 Введение в модуль «Контроль, управление и оптимизация операций»**

Технология управления становится более важной темой во всех областях, потому что ее использование может помочь уменьшить потребление энергии и ресурсов. Чтобы сделать работу очистных установок воды или сточных вод, более эффективной, отдельные этапы должны быть предусмотрены, а последовательность должна быть понятна и перепроверена. Изменение и поддержание уровней заполнения являются общими ежедневными задачами. Эти процессы обычно проходят в фоновом режиме, которые не сразу заметны. Тем не менее, процессы контроля, такие как уровень заполнения, давление и скорость потока имеют большое значение. Экономия, улучшенное качество и безопасность для персонала и машинного оборудования достигается при помощи контроля процесса. SCADA (диспетчерское управление и сбор данных) системы, используется для сбора данных. И все же анализ часто выполняется вручную. Коммунальное водоснабжение сталкивается с проблемой эффективного извлечения полезной информации из данных.

Вот несколько примеров приложений, в которых эти факторы оказывают существенное влияние.

### 1.3.1 Контроль давления



Манометр в Системе Водоснабжения

#### Пример: водоснабжение

После забора воды из глубоких скважин, озер или рек и ее очистки, вода подается или непосредственно потребителю либо с применением других сооружений. Чтобы обеспечить поставку питьевой воды даже самому отдаленному потребителю, необходимы насосные станции, который гарантируют необходимое давления воды. Потребительские ожидания высоки относительно качества воды и минимального давления воды. Поэтому, давление воды постоянно контролируется и регулируется.

### 1.3.2 Контроль расхода

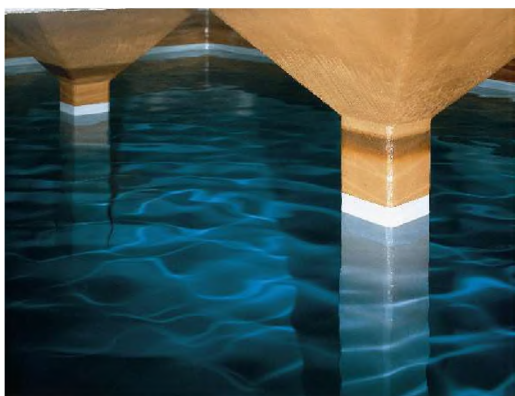


Водомер в домашнем хозяйстве

#### Пример: водомер

Домашний водомер постоянно измеряет расход воды потребителем, измеряя общую скорость потока в линии подачи водопроводной воды. Потребитель надеется на точное считывание фактически израсходованных объемов. Качество коммунального водоснабжения также зависит от точности водомеров. Отклонение приводит к потере дохода для одной стороны и ошибочному учету расхода для другой.

### 1.3.3 Контроль уровня заполнения



Резервуар питьевой воды (источник: Festo)

#### Пример: водонапорная башня

Чтобы гарантировать постоянную поставку питьевой воды, вода подается в водонапорные башни, где вода сохраняется, прежде чем распределяться в сетях водоснабжения населенного пункта. Уровни заполнения в этих башнях должны быть максимально постоянными, несмотря на то, что какое-то количество воды забирается потребителями.

Поток воды от водонапорной башни попадает в водопроводную сеть. Оттуда потребители получают доступ непосредственно через кран, или вода накапливается например, в туалетных бачках.

#### Дальнейшие примеры давления, расхода и контроля уровня наполнения

- Работа фонтанов обеспечивается при помощи насоса и резервуара воды.
- Давление в системе, должно быть постоянным даже в случае переменного водопотребления.



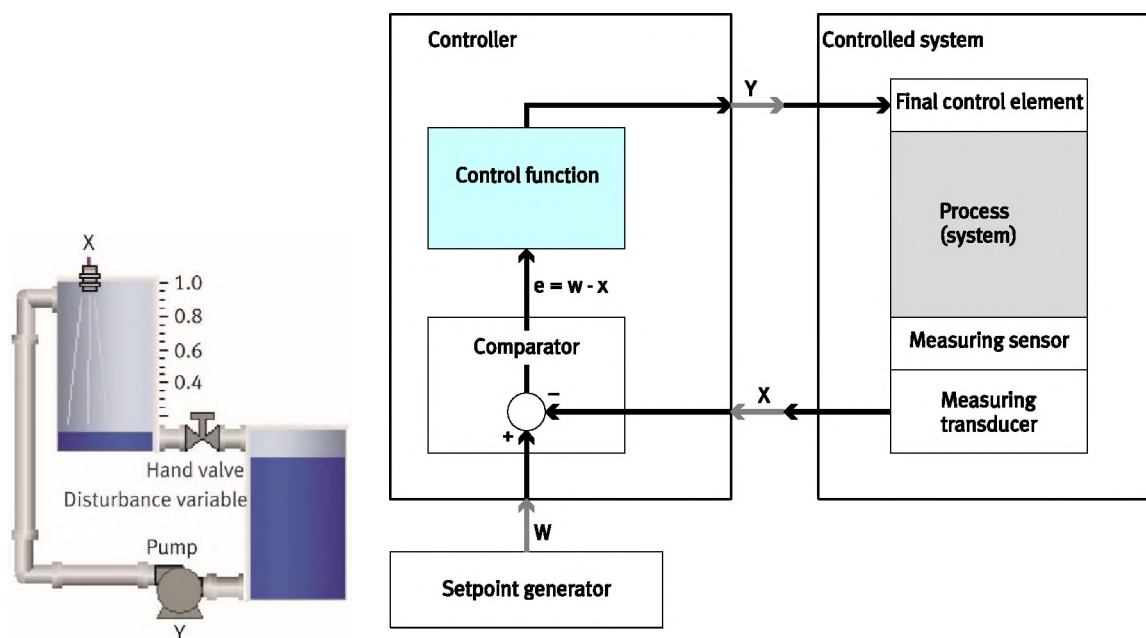
- Определенное количество воды добавляется, чтобы не было сбоя в системе. Общая подача регулируется по времени, для обеспечения постоянной величины.
- Охлажденный смазочный материал закачивается в корпус оборудования, чтобы обеспечить его непрерывную подачу. Охлажденный смазочный материал отводится все время, во время процесса механической обработки. Уровень заполнения постоянно контролируется.
- Насосы отводят охлаждающуюся воду из автомобильных радиаторов на двигатель машин, для того, чтобы не было перегрева. Расширительный бак компенсирует изменения объема, из-за теплового расширения, и потерь.
- Жидкости перекачиваются из одной емкости в другую для хранения в системах наполнения. Если какое-либо количество жидкости отбирают, то, уровень заполнения должен быть выровнен.

## Практическое занятие №2

### 1.4 Описание проблемы

Техническими системами часто управляют при помощи обратной связи. В системах с обратной связью вход сравнивают с выходом. В некоторых системах используют датчик, чтобы измерить ошибку, контроллер вычисляет переменную, которой управляют, и применяют обратную связь к системе. Часто есть задержка между обнаружением ошибки и применением вычисленной переменной обратной связи в управляемой системе.

Схема управления всегда состоит из управляющего устройства (регулятор с обратной связью) и устройства, которое будет отрегулировано (управляемая система), например, система уровня наполнения



Принципиальная схема системы регулирования

Задача контроллера с обратной связью (функция управления) состоит в том, чтобы управлять системой так, чтобы это осталось в определенном установленном виде  $w$ . С этой целью фактическое значение  $x$  постоянно измеряется и сравнивается с установленным значением  $w$ . Регулятор вычисляет переменную, которой управляют,  $Y$ . Переменная, которой управляют, влияет на процесс через выходной элемент управления.



Знание характеристик управляемой системы важно для выбора и корректировки регулятора. Характеристики управляемых систем обычно определяются во время тестового прогона.

#### 1.4.1 Прерывистые и непрерывные регуляторы

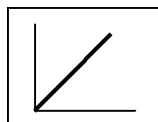
Фактическое значение измеряется, используя аналоговые датчики для обоих типов регуляторов.

Для прерывистых регуляторов: у переменной, которой управляют,  $Y$  есть только два состояния (вкл/выкл).

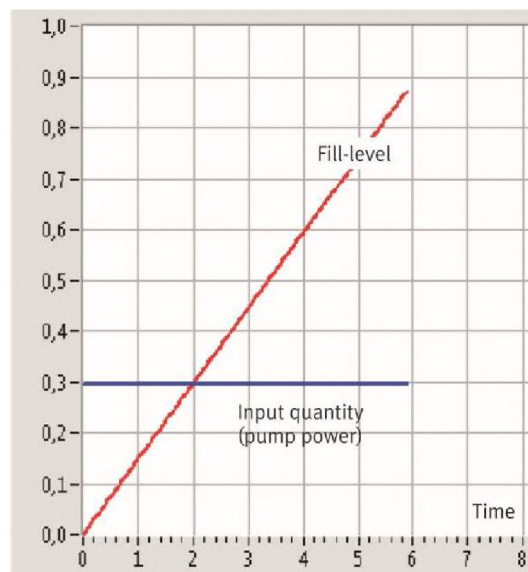
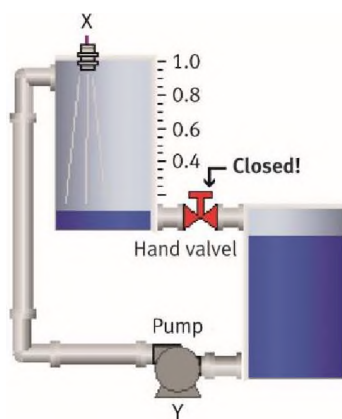
Для непрерывных регуляторов: переменная, которой управляют,  $Y$  выведена на экран бесконечно корректируемым способом, например, диапазоном от 0 до 10 В.

#### 1.4.2 Интегральная система: «Емкость без отбора»

Клапан отбора закрыт, и корпус представляет интегральную систему во время наполнения. Система накапливает - интегрирует - входит вода. Корпус заполняется линейным способом. У системы нет коррекции.



Символ для интегральной системы

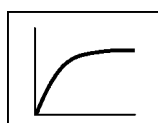


Пример для интегральной системы

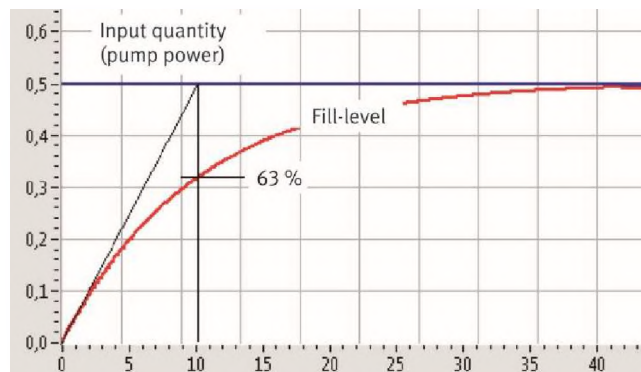
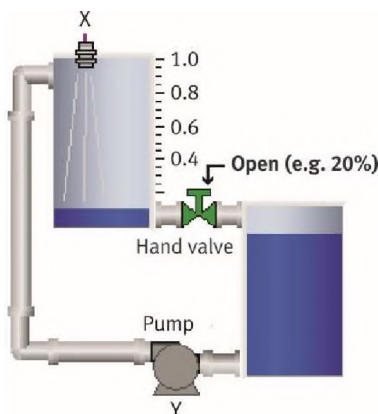
и ее характерный график

#### 1.4.3 Система PT1: «Емкость с отбором»

Предварительно емкость наполнится жидкостью непрерывным потоком. Если вода забирается одновременно через клапан отбора, корпус представляет систему PT1 (система с регулированием).



Обозначение для системы PT1



Пример для системы с регулированием и типовой график для системы 1-го порядка

#### Учебное примечание

Зависимость уровня наполнения и гидростатического давления – экспоненциальная функция более или менее близко описывает процесс.

Системы, которые демонстрируют эти характеристики, называют системами 1-го порядка. Характерная переменная - временная константа  $T$  [секунды]. Это - время, требуемое для достижения приблизительно 63% уровня наполнения. Поскольку производительность системы варьируется, то схема управления - соответственно. В упражнениях, описанных позже, мы только изучать работу схемы управления с системой РТ1.

#### ■ Предварительные вопросы

1. Как себя ведет интегральная система, при включенном насосе вовремя заполнения?

Уровень наполнения остается постоянным.

2. Как система РТ1 себя ведет, когда насос выключен во время заполнения?

Уровень заполнения опускается до тех пор, пока бак не опустеет.

#### 1.5 Упражнения

Два упражнения проводятся с целью сохранения постоянного указанного уровня наполнения в верхнем резервуаре, используя технологию с обратной связью. Исследование характеристик, следующих двух методов управления с помощью:

1. Двухступенчатый регулятор: Включение и выключение насоса.
2. Аналоговое управление: Постоянно изменяя напряжение в насосе.

### 1.5.1 Управление уровнем наполнения, используя двухступенчатый регулятор

#### ■ Описание задачи

Двухступенчатые контроллеры используются везде, где отклонение управления позволено, например, в холодильниках, нагревателях, солнечных системах, уровнях заливки для охлаждения смазки, уровнях заливки в гальванизации систем и бассейнов. У этих систем есть большая постоянная величина времени, так, чтобы произошли только минимальные частоты переключения несмотря на небольшую разницу в переключении.

Регулятор уровня наполнения (прерывистое управление) должен быть выполнен с насосом в режиме двоичного счета (вкл\выкл). Насос будет включен и выключен регулятором программного обеспечения.

#### Учебное примечание

Значения в схеме управления определены стандартизированным способом, например, между 0 и 1 или между 0% и 100%.

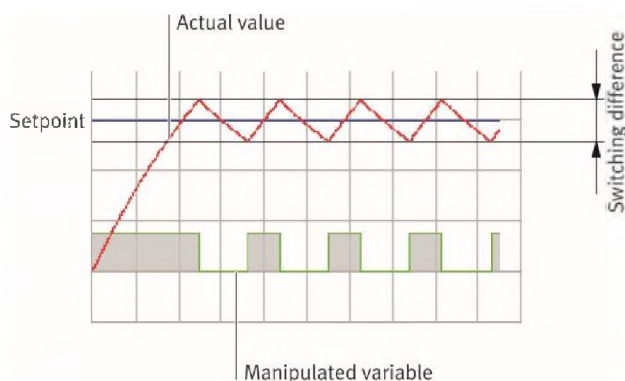
Эти значения часто преобразовываются для пользователя в общие физические значения, такие как объем в литрах, уровень воды в мм или других.

#### Обозначения в схеме управления:

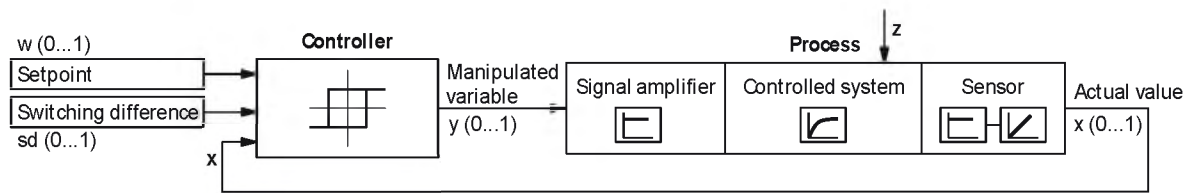
| Термин                                   | Символ |
|--|--------|
| Установка положения                      | w      |
| Фактическое значение                     | x      |
| Интервал включений                       | sd     |
| Переменная, которой управляют (вкл\выкл) | Y      |
| Диапазон изменений                       | z      |
| Погрешность                              | e      |

Как правило среднее значение уставки положения имеет интервал включений, sd.

#### Основная функция схемы управления как пример регулируемой системы уровня наполнения с открытым выходом (PT1) и двухступенчатым регулятором:



## Двухступенчатая логистика регулятора:



Где фактическое значение  $\leftarrow$  (установка – половина интервала включения) установка с хранением = 1

Где фактическое значение  $\rightarrow$  (установка + половина интервала включения) установка с хранением = 0

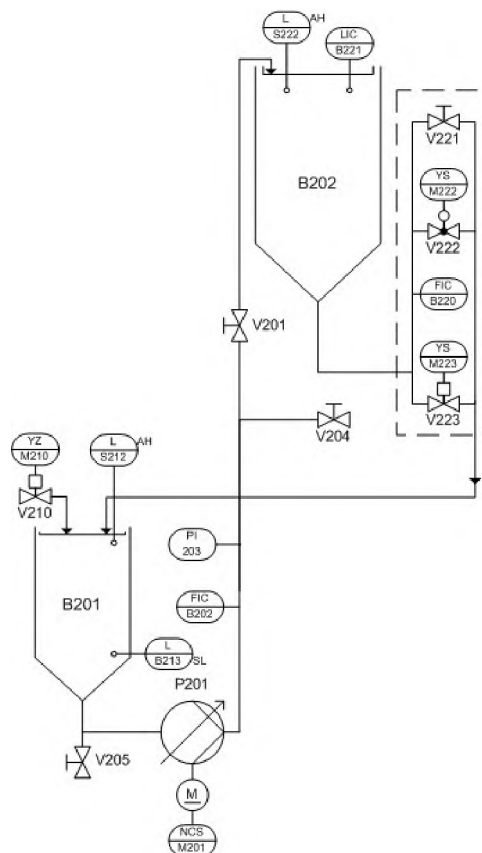
### ■ Результаты обучения

Если вы просчитали основные принципы и успешно завершили это упражнение, вы можете:

- отличать линейные и не линейные системные характеристики регулирования
- показывать линейные и не линейные системные характеристики регулирования, используя EDS® «Управление водными ресурсами»
- Регулировать уровень заполнения при помощи двухступенчатого регулятора и программного обеспечения FluidLab® «Управление водными ресурсами»
- описать параметры настройки регулятора и характеристики, используя EDS® «Управление водными ресурсами»
- объяснить влияние интервала включений и диапазон изменений.

### ■ Схема

Схема системы Водоснабжения без главной накопительной емкости :

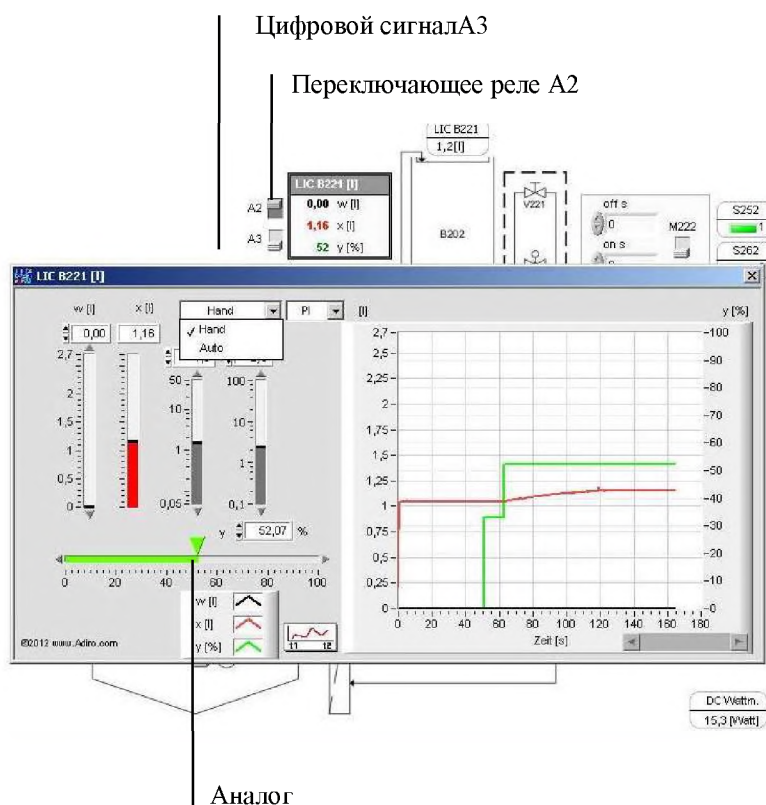


## ■ Задачи

### 1. Ввод в действие: Проверить пункты, перечисленные в следующем протоколе.

| Задачи   | Выполнено | Примечание/наблюдение |
|--|-----------|-----------------------|
| Трубопроводы собраны согласно схеме, P&I и герметичны (стандартное расположение, по - отдельности или как целая система "EDS") |           |                       |
| Нижняя емкость должна быть заполнена 3 литрами воды, и верхняя пустая.   |           |                       |
| Тестовый насос, вкл/выкл при помощи ПК   |           |                       |
| Протестируйте сигнал датчика уровня наполнения   |           |                       |
| Откройте V222 двух ходовой шаровый клапан и ручной вентиль V221  |           |                       |
| Запустите программное обеспечение и откройте меню "Two-step controller".   |           |                       |

### 2. Запустите программное обеспечение и откройте „two-step controller“ меню



#### Учебные примечания

Вводятся различные параметры настройки для проведения упражнений. Чтобы внести любые изменения в схему управления, желательно изменить только один параметр за один раз и затем провести задачу.

**3. Установите цифровые значения и диапазон переключения в соответствии с заданным в таблице.**

**Запишите свои наблюдения.**

**Учебные примечания**

Предпочтительными являются соответствующие параметры настройки, включенные в следующую таблицу.

К изменяемым переменным относятся степень открытия и закрытия ручного вентиля V221 или 2-х-ходового электромагнитного клапана V223 с электрическим приводом.

| Настройки |                       |                          |                          | Наблюдения  |
|-----------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|---|
|           | Параметры настройки w | Диапазон переключений sd | Выбор переменных z       |   |
| 1         | 1 л                   | 0.1 л                    | V222 и V221 открыты      | Высокая частота переключения, быстрое заполнение, быстрое опорожнение.  |
| 2         | 2 л                   | 0.1 л                    | V222 и V221 открыты      | Высокая частота переключения, заполнение и опорожнение умеренные        |
| 3         | 2.5 л                 | 0.1 л                    | V222 закрыт, V221 открыт | Высокая частота переключения, заполняется медленно, опорожняется быстро |
| 4         | 2 л                   | 0.2 л                    | V222 и V221 открыт       | Частота переключения малая  |
| 5         | 2 л                   | 0.2 л                    | V222 закрыт, V221 открыт | Заполнение быстрое, опорожнение медленное                               |



Демонстрационное решение управления уровнем заполнения с двухступенчатым контроллером

## 1. Как влияет диапазон переключений на регулирование?

Чем меньше диапазон переключения, тем выше частота коммутации, и тем больше отклонение от заданного значения. Высокие частоты коммутаций, могут привести к преждевременному износу приводов.

## 2. Каким образом изменение переменной z, влияет на результат упражнения?

Чем больше изменений переменной z переменная тем медленнее заполняется резервуар.

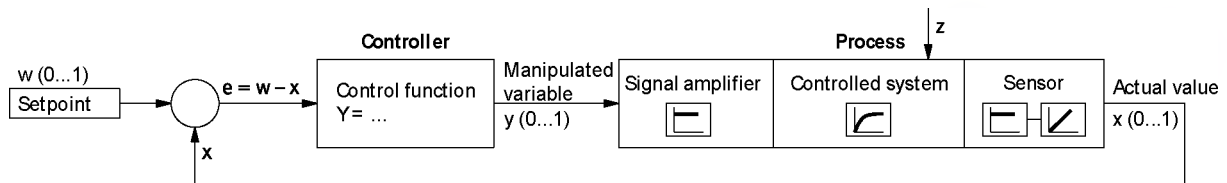
### 1.5.2 Управление уровнем заполнения, используя непрерывный контроллер

#### ■ Описание проблемы

Если никакое системное отклонение недопустимо в схеме управления, должны использоваться непрерывные контроллеры. Непрерывные контроллеры характеризуются, как, аналог управления переменной, когда датчик генерирует аналоговый сигнал. В зависимости от функции управления переменная, которой управляют, определяется при помощи различных математических формул.

#### Принципиальная схема управления с непрерывным контроллером.

Система уровня заполнения с открытым выходом (производительность PT1), например, используется в схеме управления:



Следующие функции управления могут использоваться:

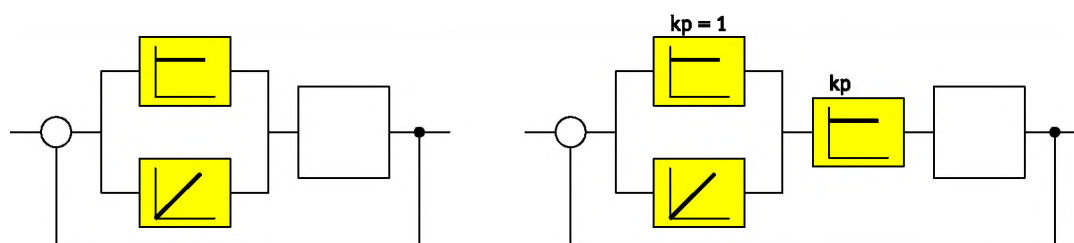
| Диспетчер      | Графический символ | Функция   |
|----------------|--------------------|---|
| P контроллер   |                    | $y = k_p \times e$<br>$k_p$ = корректируемый коэффициент усиления<br>$e$ = системное отклонение $w - x$   |
| I контроллер   |                    | $y = e_{sum} \times TA/Ti$<br>Корректируемое интегральное время ( $Ti$ )<br>$e_{sum}$ = сумма системного отклонения $e$<br>Системное отклонение $e$ сложено во время каждого цикла.   |
| PI контроллер  |                    | $Y = k_p \times (e + e_{sum} \times TA/Tn)$<br>Скорректируйте $k_p$ и сбросьте время ( $Tn$ )<br>$TA$ = время выборки, время цикла программы  |
| PID контроллер |                    | $Y = k_p (e + e_{sum} \times TA/Tn + (\text{электронное-}e\_alt) \times TB/TA)$<br>Скорректируйте производное время ( $TB$ ),<br>$e\_alt$ = системное отклонение от предыдущего цикла |



Для оптимального выбора регулятора должно быть известно время отклика системы. Это позволяет делать заключения относительно динамического отклика управляемой системы. Таким образом, регулирование котроллером обеспечено.

Время отклика управляемой системы будет определено, записью переходного отклика системы. Для систем с задержками, где есть аккумулярование энергии, временная константа управляемой системы определяется, применив касательную или, в случае многократных задержек, флективную касательную.

Чтобы использовать в своих интересах положительные характеристики контроллера Р и I контроллер нужно объединить. Это может быть сделано двумя различными способами:



В комбинации регуляторы подключены параллельно - слева и в комбинации последовательно - справа. В фактической практике и в системе FluidLab® «Управление водными ресурсами», комбинация, показанная справа, используется в соответствии с DIN 19226.

#### Учебные примечания

Насос должен управляться в аналоговом режиме для непрерывного управления. Управляющее напряжение от EasyPort до блока управления приводом между 0 и 10 В. Реле переключения A2 должно быть установлено с  $A2 = 1$ .

Надо ввести различные параметры настройки, чтобы протестировать производительность схемы управления. Чтобы сделать какие-либо выводы, желательно изменить только один параметр за один раз и затем провести упражнение.



### Примечание

Следующее теоретическое содержание подходит для аспирантов.

Регуляторы Proportional-Integral-Derivative (PID) - простые, линейные контроллеры обратной связи.

В регуляторе PID вводом дают

$$f(t) = F(t, x(t)) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

где  $K_p$  - постоянные усиления для условий обратной связи, которые умножены на ошибку.

Ошибка  $e(t) = w \times x(t)$ , отклонение вывода  $x(t)$  от желаемой постоянной установки  $w$ .

Составляющая пропорциональной времени

$$P_{out} = K_p e(t)$$

дает обратную связь, основанную на текущей ошибке.

Интегральная составляющая времени

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

дает обратную связь, основанную на накоплении прошлой ошибки.

Производная составляющая времени

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

дает обратную связь, основанную на уровне изменения по текущей ошибке.

### ■ Результаты обучения

С этим упражнением вы можете:

- управлять уровнем наполнения емкости с непрерывным контроллером при помощи программного обеспечения FluidLab® «Управление водными ресурсами»
- описать характеристики различных непрерывных контроллеров
- объяснить характеристики в схеме управления
- описать эффекты интегрального времени и системного отклонения
- объяснить характеристики времени сброса и системного отклонения
- исследовать влияние параметров настройки управления на потреблении энергии.

### ■ Схема

Согласно предыдущему упражнению.

### ■ Задачи

**1. Управление уровнем наполнения в верхнем резервуаре, используя пропорциональный контроллер**

- a) Запустите программное обеспечение и откройте меню системы водоснабжения. Переключите программное обеспечение на контроллер P.
- b) Проверьте параметры настройки программного обеспечения: реле переключения набора A2 «вкл» и определить установку.
- c) Выберите каждое из упомянутых ниже значений и выполните упражнение с контроллером P.
- d) Добавьте свои наблюдения в таблицу.

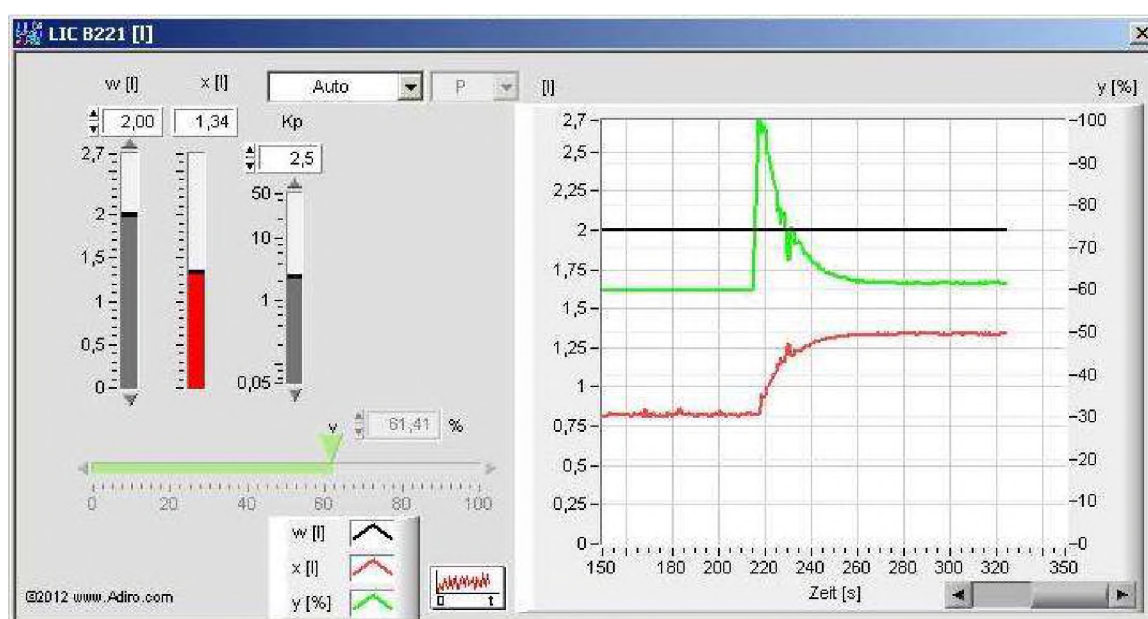
**Учебные примечания**

Пустой резервуар B202 перед каждым запуском!

Параметры настройки, включены в следующую таблицу, являются предлагаемыми.

| No. | Настройки                          |               |                         | Наблюдения   |
|-----|------------------------------------|---------------|-------------------------|--|
|     | Параметры настройки w (физический) | Усиление (kp) | Переменная управления z |  |
| 1   | 1 л                                | 2.5           | V222 и V221 открыты     | Значительное системное отклонение  |
| 2   | 1 л                                | 5             | V222 и V221 открыты     | Уменьшенное системное отклонение   |
| 3   | 1 л                                | 12.5          | V222 и V221 открыты     | Системное отклонение меньше, но все же регулятор имеет тенденцию колебаться<br>заполнение медленное, опорожнение быстрое |

| No. | Настройки                          |               |                          | Наблюдения  |
|-----|------------------------------------|---------------|--------------------------|---|
|     | Параметры настройки w (физический) | Усиление (Kp) | Переменная управления z  |   |
| 4   | 1 л                                | 12.5          | V222 и V221 закрыты      | Нет системного отклонения   |
| 5   | 1 л                                | 12.5          | V222 закрыт, V221 открыт | Системное отклонение значительное, переменная, которой управляют значительная |
| 6   | 1 л                                | 15            | V222 и V221 открыты      | Переменная, которой управляют, Y = 1;<br>Нет системного отклонения            |



Демонстрационное решение для регулятора уровня наполнения с контроллером P

е) Каковы характеристики схемы управления (P контроллер, система PT1)?

P контроллеры реагируют быстро на изменения параметров настройки. Системное отклонение не полностью устранено при использовании контроллера P с системой PT1. Чем больше Kp, тем меньше системное отклонение.

## 2. Управление, уровнем заполнения, используя интегральный контроллер

### Установка программного обеспечения

Переменная, которой управляют, I контроллер вычислена следующим образом:

$$Y = (esum) \times T_A / T_i$$

Переменная, которой управляют, Y является общим количеством всего системного отклонения (esum) умноженное на T<sub>A</sub> времени выборки, разделенное на интегральное время действия T<sub>i</sub>.

Формула показывает, что  $Y$  быстро изменяется контроллером, если  $T_i$  маленькое.  
 Если  $T_i$  большой,  $Y$  изменяется медленно, таким образом, они говорят, что контроллер ведет себя вяло.

#### Учебные примечания

Удостоверьтесь, что  $T_i$  не падает до 0, иначе  $Y$  был - бы не определен в этом случае.  
 Должен быть пустой резервуар B202 перед каждым запуском

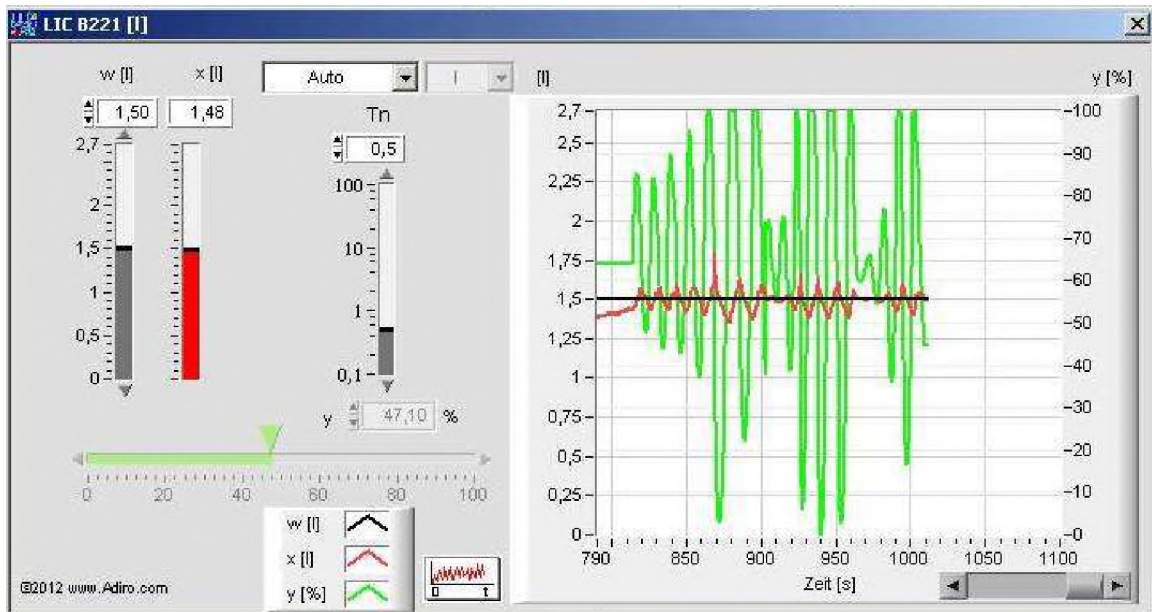
Физические параметры настройки  $w$  зависят от размера резервуара и будет ли единица измерения уровня заполнения в литрах или в мм.

- Запустите программное обеспечение и переключите программное обеспечение на "I контроллер".
- Проверьте параметры настройки программного обеспечения: реле переключения набора A2 «вкл.» и определите параметры настройки.
- Выберите каждое из упомянутых ниже значений и выполните упражнение с I контроллером.
- Добавьте свои наблюдения в таблицу.

| №. | Параметры настройки $w$ , (физические) | Настройки                             |   | Наблюдения   |
|----|--|---------------------------------------|---|--|
|    |  | Интегральное время действия ( $T_i$ ) | Переменная управления $z$ , V222 и V221 |  |
| 1  | 1.5 л                                  | 1 с                                   | 100% открытие                           | Действие контроллера медленно выполняются                |
| 2  | 1.5 л                                  | 0.5 с                                 | 100% открытие                           | Системное отклонение реагирует быстрее                   |
| 3  | 1.5 л                                  | 0.1 с                                 | 100% открытие                           | Системное отклонение реагирует быстрее все же, изменяясь |
| 4  | 1.5 л                                  | 10 с                                  | 100% открытие                           | Более низкое отклонение и колебание, но медленный отклик |

#### Учебные примечания

Вполне возможно, что стабилизации не происходит в реальной системе, и происходят непрерывные изменения.



Демонстрационное решение для управления уровнем заполнения с I контроллером

а) Каков эффект от интегрального времени регулирования?

Чем меньше интегральное время, тем быстрее контроллер реагирует.

б) Что вы можете сказать о системном отклонении?

I контроллер вызывает ошибку. После периода ошибки, системного отклонения ( $e = w - x$ ), может устанавливаться при значении нуля в системе ПИ.

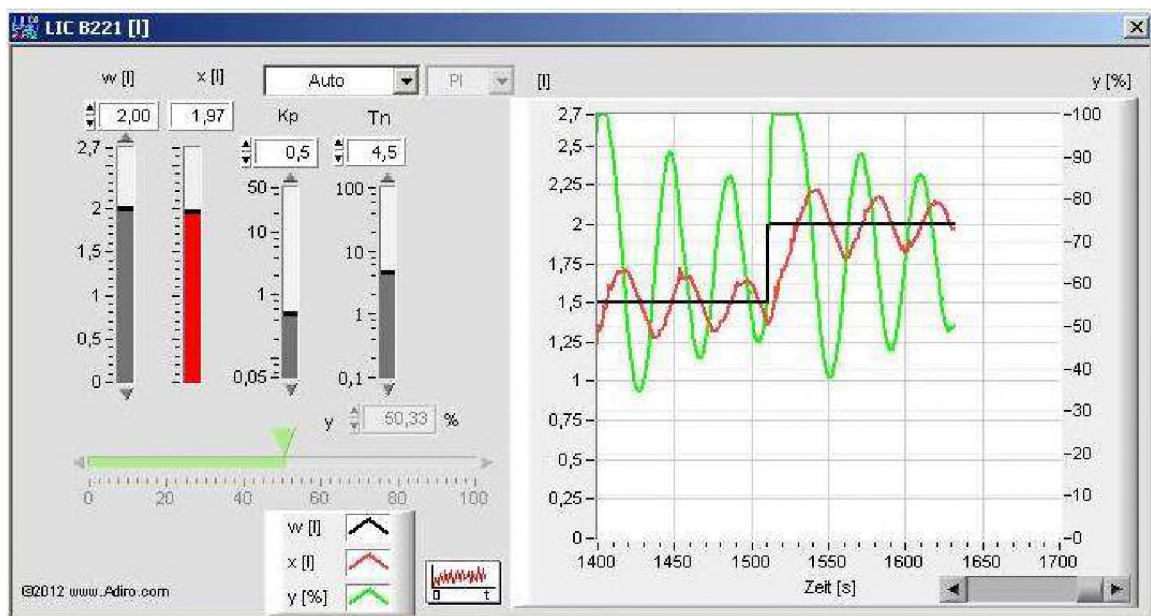
### 3. Управление, уровнем заполнения, используя пропорционально-интегральный контроллер (параллельны компонентам P и I)

#### Учебные примечания

Пустой резервуар B202 перед каждым пуском.

- Запустите программное обеспечение и выберите "PI-Controller".
- Проверьте параметры настройки программного обеспечения: реле переключения набора A2 «вкл.» и определите параметры настройки.
- Выберите каждое из значений, упомянутых ниже для PI (DIN) контроллера, и выполните упражнение.
- Внесите свои наблюдения в таблицу.

| No. | Настройки             |               |                      |                                      | Наблюдения                                     |
|-----|-----------------------|---------------|----------------------|--------------------------------------|--|
|     | Параметры настройки w | Усиление (kp) | Время возврата $T_n$ | Переменная управления z, V222 и V221 |  |
| 1   | 1 л                   | 1             | 1 с                  | 100% открыто                         | Контроллер не активен                          |
| 2   | 1 л                   | 3             | 1 с                  | 100% открыто                         | Легкое колебание                               |
| 3   | 1 л                   | 3             | 0.1 с                | 100% открыто                         | Легкое колебание                               |
| 4   | 1 л                   | 0.5           | 4.5 с                | 100% открыто                         | Хорошие параметры настройки                    |
| 5   | 1 л                   | 0.3           | 3.5 с                | 100% открыто                         | Высокочастотное малоамплитудное колебание      |
| 6   | 1 л                   | 0.4           | 5 с                  | 100% открыто                         | Хорошие параметры настройки, стабильный отклик |
| 7   | 1 л                   | 0.5           | 5 с                  | 100% открыто                         | Хорошие параметры настройки                    |



Демонстрационное решение для управления уровнем наполнения с контроллером PI

а) Что вы можете сказать про время срабатывания  $T_n$ ?

Чем меньше  $T_n$ , тем больше эффект компонента I.

б) Что вы можете сказать о системном отклонении?

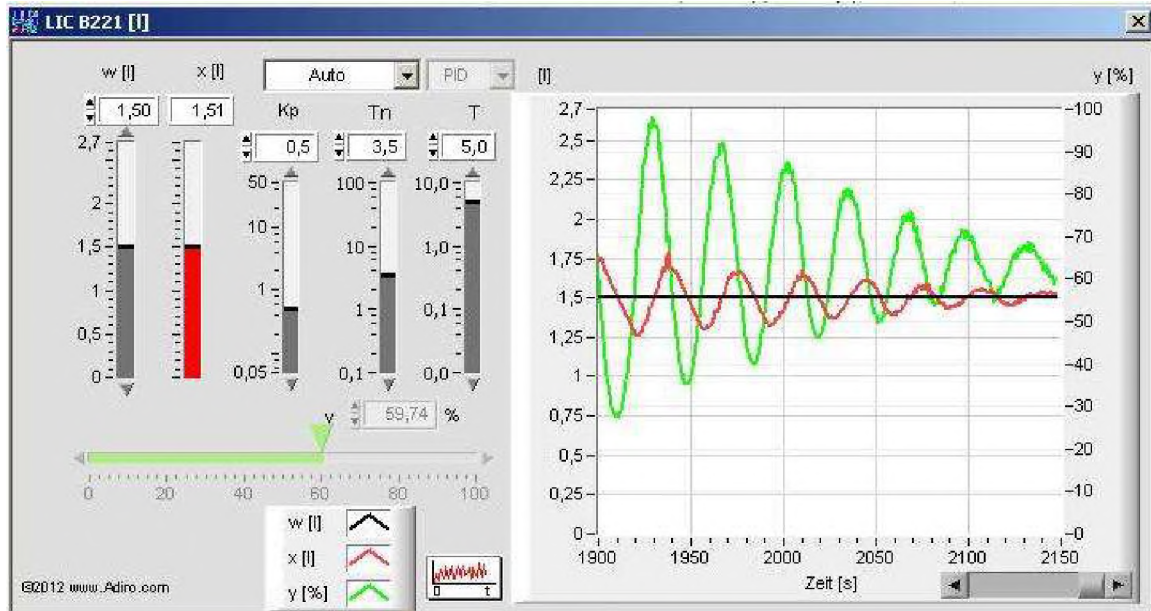
Хорошо скорректированные контроллеры PI демонстрируют минимальную ошибку и быстро устанавливаются.



### Учебные примечания для преподавателя

С FluidLab® «Управление водными ресурсами» также возможно представить контроллер PID.

Параметры настройки контроллера PID:  $w = 1.5$  л;  $k_p = 0.5$ ;  $T_n = 3.5$ ;  $T = 5$



Демонстрационное решение для управления уровнем заполнения с контроллером PID

#### 4. Эффекты различных стратегий управления на потребление энергии

а) Как влияют различные параметры настройки управления уровня заполнения на потребление энергии?

б) В заполненной таблице, найдите эффективные параметры настройки (Предварительно введенные значения в таблице - только предположения).

| No. | Параметры настройки $w$ (физический) | Настройки          |                          |   | Наблюдения        |                     |
|-----|--------------------------------------|--------------------|--------------------------|---|-------------------|---------------------|
|     |                                      | Усиление ( $k_p$ ) | Время срабатывания $T_n$ | Переменная управления $z$ , V222 и V221 | Продолжительность | Потребление энергии |
| 1   | 1 л                                  | 3                  | 0.1 с                    | 100% открыто                            | 5 мин             | 1.75 Втч            |
| 2   | 1 л                                  | 0.5                | 4.5 с                    | 100% открыто                            | 5 мин             | 1.85 Втч            |
| 3   | 1 л                                  | 0.5                | 5 с                      | 100% открыто                            | 5 мин             | 1.71 Втч            |
| 4   | 1 л                                  | 0.3                | 3.5 с                    | 100% открыто                            | 5 мин             | 2.31 Втч            |

PI [DIN] контроллер

| No. | Наблюдения                         |                    |                                      |                   |                     |
|-----|------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|---------------------|
|     | Параметры настройки w (физический) | Диапазон изменений | Переменная управления z, V222 и V221 | Продолжительность | Потребление энергии |
| 1   | 1 л                                | 0.01               | 100% открыто                         | 5 мин             | 1.88 Втч            |
| 2   | 1 л                                | 0.1                | 100% открыто                         | 5 мин             | 2.18 Втч            |
| 3   | 1 л                                | 0.2                | 100% открыто                         | 5 мин             | 1.57 Втч            |
| 4   | 1 л                                | 0.4                | 100% открыто                         | 5 мин             | 1.51 Втч            |

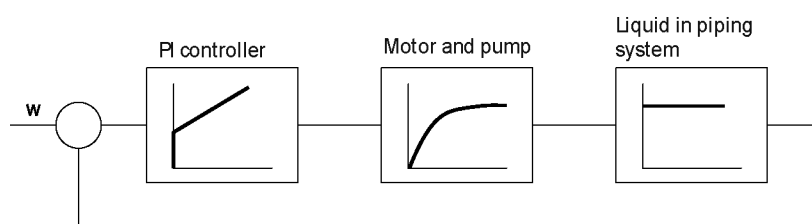
Двухступенчатый контроллер

### 1.5.3 Управление, потоком используя пропорционально-интегральный контроллер

#### ■ Описание проблемы

Общим потоком нужно управлять.

Используется контроллер PI. Для этого упражнения вода будет просто перекачиваться из резервуара V301 к резервуару V302.



Концепция цепи управления

#### ■ Расположение

Упражнение демонстрируется при помощи системы водоотведения EDS® «Управление водными ресурсами». Поочередно Вы можете использовать систему очистки воды или систему очистки сточных вод.



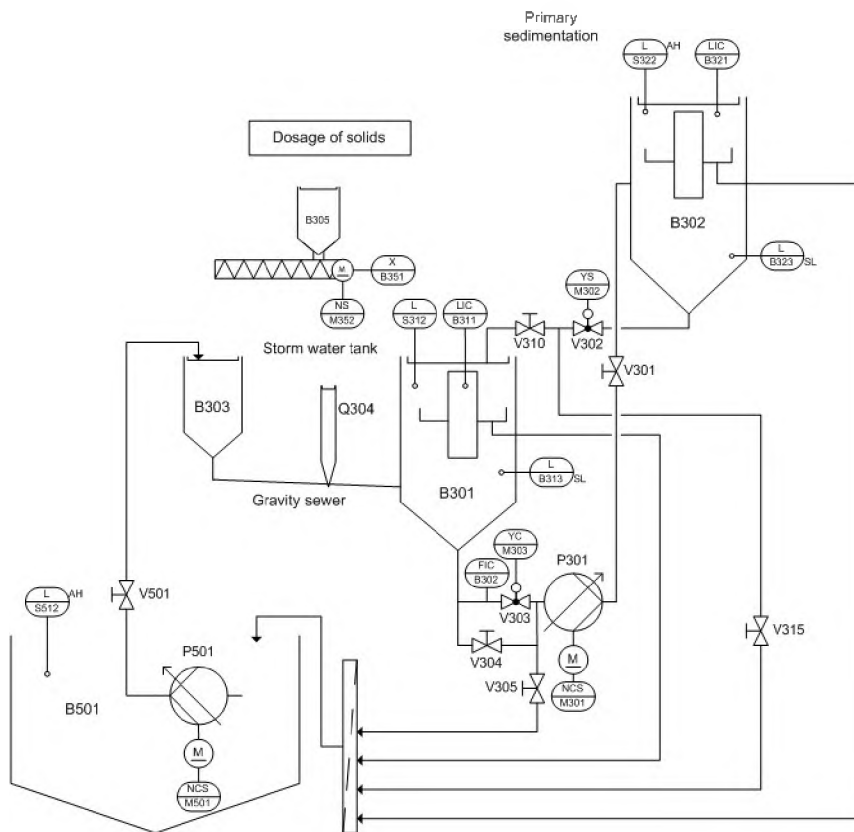


Схема трубопроводов и арматуры системы водоотведения

### ■ Результат обучения

С этим упражнением вы можете:

- управлять потоком с контроллером PI при помощи программного обеспечения FluidLab® «Управление водными ресурсами»
- описать параметры настройки контроллера, характеристики и эффект переменной волнения
- исследовать, как потребление энергии влияет на параметры настройки управления.

### ■ Задачи

1. Ввод в действие: проверьте все пункты, перечисленные в следующем протоколе

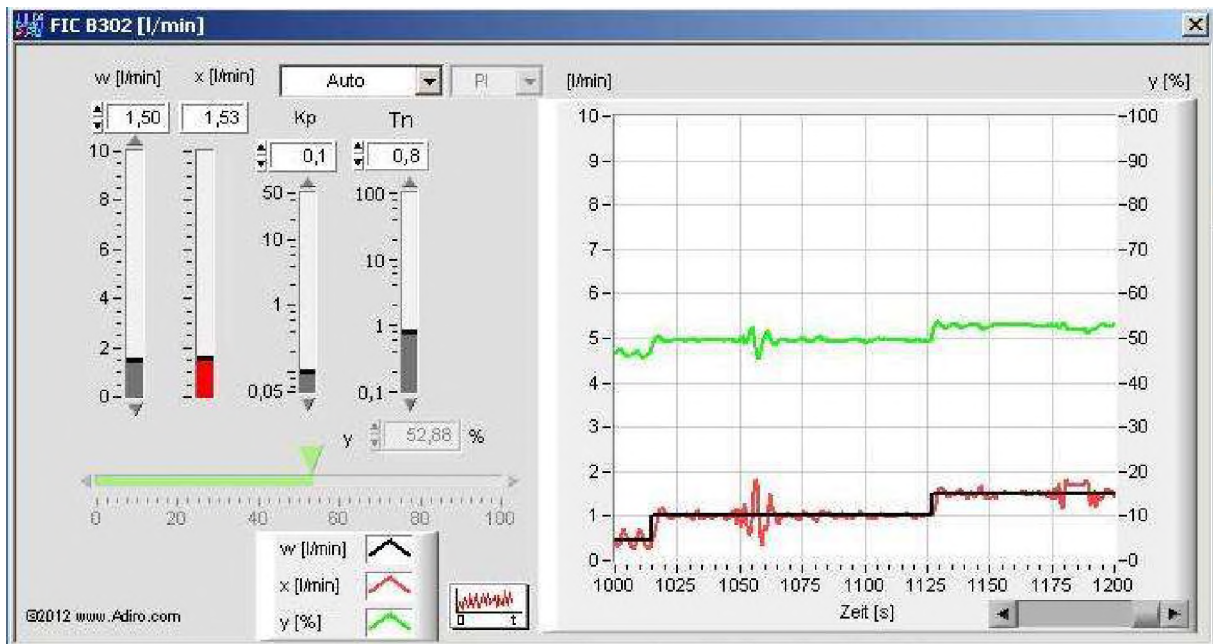
| Задачи   | Завершение | Наблюдения |
|--|------------|------------|
| Трубопроводы соединены и герметичны  |            |            |
| Насос подключен и проверен   |            |            |
| Датчик потока соединен и протестирован   |            |            |
| V305 и V315 закрыты  |            |            |
| V303, V301, V302 и открытый V310   |            |            |
| Резервуар B301 заполнился 2.5 литрами воды   |            |            |
| Откройте FluidLab® «Управление водными ресурсами», выберите “Wastewater Disposal” и выберите “Continuous controller” из меню |            |            |

### Учебные примечания

Различные параметры настройки должны быть применены при проведении испытаний. Чтобы сделать любые выводы, всегда желательно изменить только один параметр за один раз и затем провести упражнение. Параметры настройки, включенные в следующую таблицу, являются предложенными.

2. Выберите каждое из упомянутых ниже значений и задокументируйте ваши наблюдения.

| No. | Настройки                            |                    |                          |   | Наблюдения   |
|-----|--------------------------------------|--------------------|--------------------------|---|--|
|     | Параметры настройки $w$ (физический) | Усиление ( $k_p$ ) | Время срабатывания $T_n$ | Переменная управления $z$ , ручной вентиль V301 |  |
| 1   | 1 л/мин                              | 1.0                | 1.5 с                    | 100% открыто                                    | Контроллер - очень инертен, сильный компонент P  |
| 2   | 1 л/мин                              | 0.1                | 1.5 с                    | 100% открыто                                    | Компонент P слабый, контроллер медленно настраивается. Система, стабилизируется за 60 с.   |
| 3   | 1 л/мин                              | 0.1                | 0.8 с                    | 100% открыто                                    | I компонент становится более сильным, системное отклонение, реагирует быстрее. Система, стабилизируется за 40 с., но с маленькими пульсациями. |
| 4   | 1 л/мин                              | 0.1                | 0.8 с                    | 20% открыто                                     | Пункты настройки не обеспечены. Колебание очень маленькое.   |
| 5   | 1 л/мин                              | 0.1                | 0.8 с                    | 50% открыто                                     | Система, стабилизируется приблизительно за 40 с.   |



3. Как переменная управления  $z$ , влияет на результат упражнения?

Переменная управления может быть исправлена, пока контроллер в соответствующем диапазоне управления.

#### 4. Как различные параметры настройки управления влияют на потребление энергии?

В заполненной таблице, найдите эффективные параметры настройки (Предварительно введенные значения в таблице - только предположения).

| No. | Настройки                             |               |                             |  | Наблюдения        |                     |
|-----|---------------------------------------|---------------|-----------------------------|--|-------------------|---------------------|
|     | Параметры настройки w<br>(физический) | Усиление (кр) | Время сброса T <sub>n</sub> | Переменная волнения z,<br>Ручной Клапан V301 | Продолжительность | Потребление энергии |
| 1   | 1 л/мин                               | 3             | 0.1 с                       | 100% открыто                                 | 5 мин             | 2.42 Втч            |
| 2   | 1 л/мин                               | 0.1           | 0.8 с                       | 100% открыто                                 | 5 мин             | 2.38 Втч            |
| 3   | 1 л/мин                               | 0.5           | 1.3 с                       | 100% открыто                                 | 5 мин             | 2.36 Втч            |

### Практическое занятие №3

#### 1.6 Описание

Следующие два упражнения относятся к главе 4 “Работа канализационных систем” в техническом руководстве “Водоотведение”. Пропорциональный клапан позволяет моделировать и управлять уровнем наполнения, например, от аккумулирующей емкости, и до очистной станции сточных вод.

#### 1.7 Упражнения

##### ■ Описание проблемы

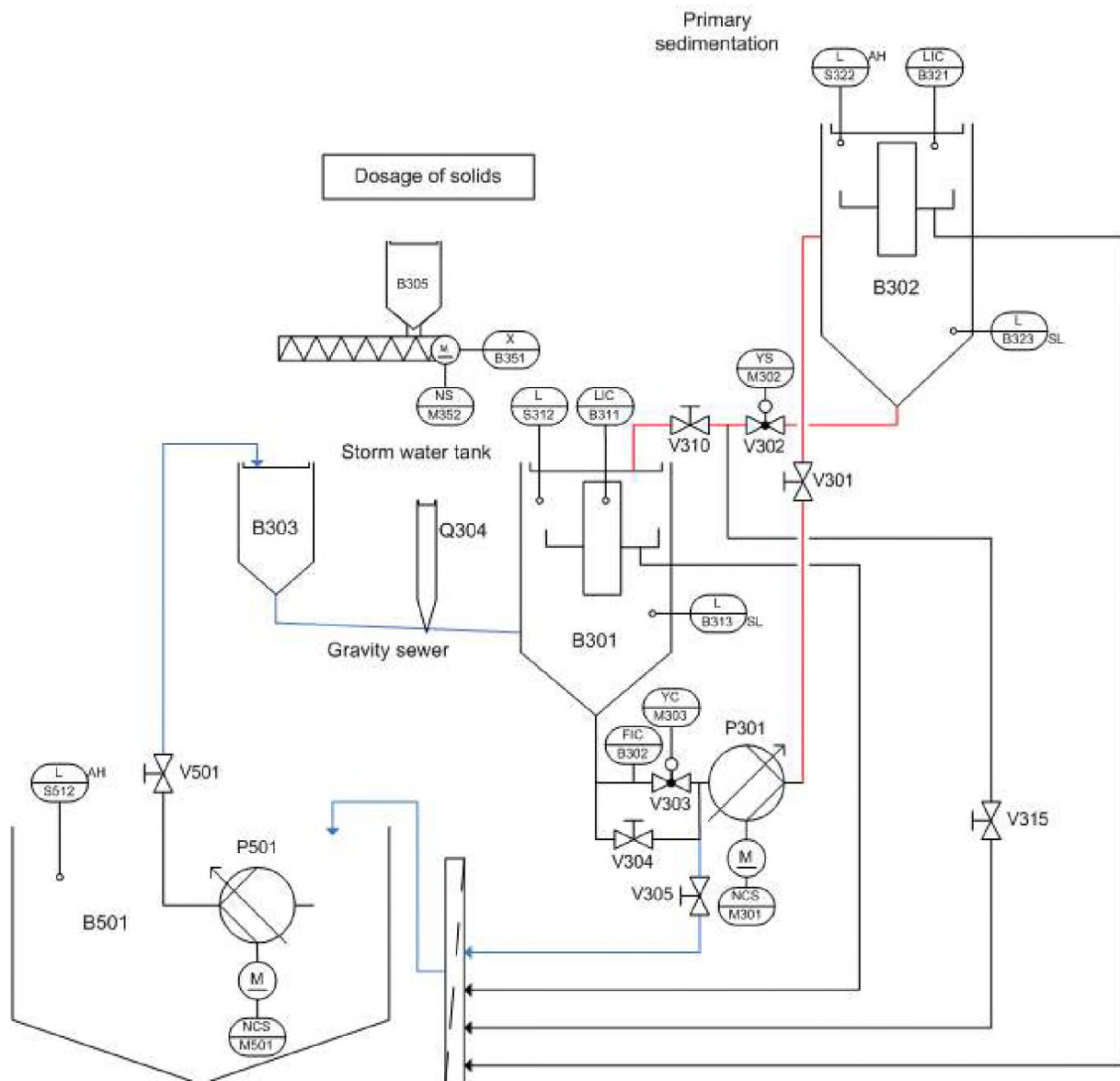
##### Объемное управление подачей и управление отбором

С операционной точки зрения, устройство дросселя аккумулирующей камеры, играет центральную роль. Блокирование устройства дросселя приводит к чрезмерному загрязнению потоков. Если отрегулированный расход существенно превышает запланированный, то гидравлическая перегрузка очистной станции сточных вод может привести к уменьшенной способности очистки или даже оттоку осадка из вторичного отстойника.

##### ■ Схема

Расположение для следующих двух упражнений - то же.

- Для упражнения 3.2.1 “Управление потоком” используется красная схема.
- Для упражнения 3.2.2 “Используется управление отбором” синяя схема.



Потоком и отбором управляют через пропорциональный клапан V303. В ПО всплывающее окно клапана работает и похоже на системное меню насоса.

### 1.7.1 Общее управление потоком

#### ■ Результаты обучения

С этим упражнением вы можете скорректировать общий поток при помощи различных параметров настройки в программном обеспечении FluidLab® «Управление водными ресурсами», чтобы управлять пропорциональным клапаном носителей.

## ■ Задачи

### 1. Подготовка системы водоотведения (красная схема)

| Задачи  | Выполнено | Наблюдение |
|---|-----------|------------|
| Трубопроводы смонтированы и герметичны – используется красная схема               |           |            |
| Насос подключен и проверен  |           |            |
| Датчик потока подключен и протестирован   |           |            |
| Электропроводка и соединительные кабели соединены                                 |           |            |
| V305 и V315 закрыты   |           |            |
| V303, V301, V302 и открытый V310  |           |            |
| Резервуар B301 заполнить 2.5 литрами воды   |           |            |
| Откройте FluidLab® «Управление водными ресурсами», выберите “Wastewater Disposal” |           |            |
| Запустите P301 в цифровой форме   |           |            |

### 2. Попробуйте различные значения и представьте ваши наблюдения в таблице.

Установите насос приблизительно 4.4 л/мин (80%). Поток управления с пропорциональным клапаном.

| №. | Настройки                          |               |                   |  | Наблюдения        |
|----|------------------------------------|---------------|-------------------|--|-------------------|
|    | Параметры настройки w (физический) | Усиление (кр) | Время возврата Tп | Переменная волнения z, ручной вентиль V301 |                   |
| 1  | 1.2 л/мин                          | 0.2           | 10 с              | 100% открыто                               |                   |
| 2  | 2,65                               | 0.1           | 10 с              | 100% открыто                               | Хорошая настройка |
| 3  |                                    |               |                   |  |                   |
| 4  |                                    |               |                   |  |                   |

#### 1.7.2 Управление отбором

### ■ Результаты обучения

С этим упражнением вы можете исследовать “положительные параметры настройки” для управления отбора, используя программное обеспечение FluidLab® «Управление водными ресурсами», чтобы управлять пропорциональным клапаном.

## ■ Задачи

### 1. Подготовка системы водоотведения (синяя схема)

| Задачи  | Выполнено | Наблюдения |
|---|-----------|------------|
| Трубопроводы смонтированы и герметичны – используется синяя схема                 |           |            |
| Насос подключен и проверен  |           |            |
| Датчик потока подключен и протестирован   |           |            |
| Электропроводка и соединительные кабели соединены                                 |           |            |
| Откройте FluidLab® «Управление водными ресурсами», выберите “Wastewater Disposal” |           |            |
| V301, V302 и V310 закрыты   |           |            |
| V303 и открытый V305  |           |            |
| Запустите P501 в цифровой форме   |           |            |
| Откройте V101   |           |            |
| Установите постоянный уровень воды в V301 ниже края переполнения                  |           |            |

### 2. Выберите каждое из упомянутых ниже значений и запишите ваши наблюдения.

| No. | Параметры настройки w (физический) | Настройки     |                                   |  | Наблюдения                |
|-----|------------------------------------|---------------|-----------------------------------|--|---------------------------|
|     |                                    | Усиление (кр) | Время срабатывания T <sub>n</sub> | Переменная волнения z, ручной вентиль V305 |                           |
| 1   | 0.8 л/мин                          | 0.1           | 4 с                               | 100% открыто                               | Быстрый, но не стабильный |
| 2   | 0.8 л/мин                          | 0.1           | 5 с                               | 100% открыто                               | Улучшение                 |
| 3   | 0.6 л/мин                          | 0.1           | 5 с                               | 100% открыто                               | Еще лучше                 |
| 4   |                                    |               |                                   |  |                           |
| 5   |                                    |               |                                   |  |                           |

#### Учебные примечания

Общий расход является лучшим, который ниже 0.8.

## Список использованных источников

1. ГОСТ 21.404–85. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 8 с.
2. ГОСТ 2.701–84 ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению: Справ. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 315 с.
3. ГОСТ 2.721–74 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 86 с.
4. Дятлова Е.П., Сафонова М.Р. Проектирование автоматизированных систем управления технологическими процессами ЦБП: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГТУРП, 1999. – 51 с.
5. Ключев А. С. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: справ. пособие / А. С. Ключев, В. В. Глазов, А. Х. Дубровский. – М. : Энергия, 1980. – 512 с.
6. Кулаков, М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств : учеб. для вузов / М. В. Кулаков. – М. : Машиностроение, 1983. – 423 с.
7. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения» / Владим. гос. ун-т ; сост.: К. И. Зуев, В. И. Тарасенко. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2014. – 68 с.
8. Попкович, Г. С. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения : учеб. для вузов / Г. С. Попкович, М. А. Гордеев. – М. : Высш. шк., 1986. – 392 с.
9. Пособие по проектированию автоматизации и диспетчеризации систем водоснабжения (к СНиП 2.04.02-84) / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП, 1985. – 32 с.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В. И. ВЕРНАДСКОГО»

АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ

ФАКУЛЬТЕТ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭНЕРГЕТИКИ

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ  
ВОД

**Методические указания**

к практическим занятиям для обучающихся

направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства,  
направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы  
охраны водных ресурсов»

Симферополь

2019



Оптимизация процессов очистки природных и сточных вод: Методические указания к практическим занятиям для обучающихся направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов». – Симферополь, 2019. – 19 с.

Методические указания предназначены для обучающихся по направлению подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов». В методических указаниях изложен порядок проведения практических занятий по отдельным темам. Приведены правила построения функциональных схем автоматизации и оформления нормативной документации в технических проектах АСУТП.

Составитель:

**Николенко И.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники.

Утверждено на заседании учебно-методической комиссии факультета водных ресурсов и энергетики от 24 апреля 2019 года, протокол № 8.

Одобрено на заседании кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники от 17 апреля 2019 года, протокол № 17.

© Николенко И.В., 2019

©ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского», АСиА, 2019

## Введение

На современном этапе развития техники водообработки невозможно управлять системами водоснабжения и водоотведения (СВВ) без их автоматизации. Высокая производительность оборудования, скорости потоков и физико-химических превращений, большие объемы аппаратов и сооружений, зависимость технико-экономических показателей (ТЭП) от большого числа разнообразных факторов – все это предъявляет высокие требования к управлению СВВ. Если человек-оператор раньше с успехом справлялся с задачами управления, то теперь он этого сделать не может из-за своих ограниченных возможностей: утомляемости, субъективности в оценке возникающих ситуаций, ограниченной скорости реакций на резкие изменения режимных параметров и т. п. В результате функции управления в инженерных системах и на очистных сооружениях все в большем объеме передаются автоматическим устройствам. В ближайшие годы уровень автоматизации должен вырасти в несколько раз.

В современных условиях от строителя-технолога требуются знания не только технологии и оборудования, но и автоматических устройств контроля и управления – от простейших приборов до микроконтроллеров и управляющих вычислительных систем (УВС). Технолог должен уметь за показаниями измерительных приборов «видеть» ход технологического процесса, скрытого за стенками сооружений, машин и аппаратов, вмешиваться при необходимости в работу автоматических управляющих устройств и устранять простейшие неисправности в их работе. Все это невозможно сделать без знания основных принципов управления СВВ, особенностей устройства и эксплуатации приборов, регуляторов и других средств автоматизации. Изучение этих вопросов предусмотрено в курсе «Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения».

Впервые разработки по автоматизации СВВ были выполнены специалистами Академии коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова и начали внедряться на водопроводных очистных сооружениях еще в 1934 – 1935 гг. Позже на водопроводных станциях Москвы, Санкт-Петербурга и Нижнего Новгорода были автоматизированы дозирование реагентов, регулирование скорости фильтрования и промывки фильтров, контроль ряда качественных параметров воды. В дальнейшем широкое внедрение автоматика получила на водопроводных станциях Красноярска, Новосибирска и Уфы. Высокие ТЭП достигнуты автоматизацией водоснабжения с использованием подземных вод в городах Орел и Тверь. К настоящему времени созданы системы автоматизации водоприемников, работы водопроводных сетей, процессов коагуляции, отстаивания, обеззараживания, фторирования и обесфторивания воды, а также ее реагентного умягчения и обессоливания.

Успешно выполняются работы и по автоматизации оборотных охлаждающих систем технического водоснабжения, в которых широко используют разработки лаборатории автоматизации НИИ ВОДГЕО, а также зарубежных фирм «Betz Entec Inc» (США) и «Organo» (Япония).

Автоматизация систем водоотведения началась значительно позже. Большая работа по автоматизации таких сооружений проведена в Москве на Курьяновской, Люблинской и Люберецкой станциях аэрации. На этих станциях автоматически контролируется ряд технологических параметров, регулируются процессы механической, химической и биологической очистки сточных вод в аэротенках, а также анаэробного сбраживания осадков в метантенках. Из зарубежного опыта наибольший интерес представляют оригинальная система управления кислородным и иловым режимом аэротенков фирмы «Omnium d'Assainissement», которая работает в ряде городов Франции, типовая система управления AQUAMAX-80 фирмы «Hitachi» (Япония), а также система управления фирмы «Cot» (Дания) для метантенков.

## Практическая работа №1

**Тема:** Изучение правил построения функциональных схем автоматизации

**Цель:** Научиться строить функциональные схемы автоматизации

### Теоретическая часть

Схемы функциональные разъясняют определенные процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях изделия или в изделии в целом. Этими схемами пользуются для изучения принципов работы изделия, а также при их наладке, контроле, ремонте.

Функциональная схема по сравнению со структурной более подробно раскрывает функции отдельных элементов и устройств.

Функциональные схемы являются основным техническим документом, определяющим функционально-блочную структуру отдельных узлов автоматического контроля, управления и регулирования технологического процесса и оснащение объекта управления приборами и средствами автоматизации (в том числе средствами телемеханики и вычислительной техники).

Объектом управления в системах автоматизации технологических процессов является совокупность основного и вспомогательного оборудования вместе с встроенными в него запорными и регулирующими органами, а также энергии, сырья и других материалов, определяемых особенностями используемой технологии.

Задачи автоматизации решаются наиболее эффективно тогда, когда они прорабатываются в процессе разработки технологического процесса.

В этот период нередко выявляется необходимость изменения технологических схем с целью приспособления их к требованиям автоматизации, установленным на основании технико-экономического анализа.

Создание эффективных систем автоматизации предопределяет необходимость глубокого изучения технологического процесса не только проектировщиками, но и специалистами монтажных, наладочных и эксплуатационных организаций.

При разработке функциональных схем автоматизации технологических процессов необходимо решить следующее:

получение первичной информации о состоянии технологического процесса и оборудования;

непосредственное воздействие на технологический процесс для управления им; стабилизация технологических параметров процесса;

контроль и регистрация технологических параметров процессов и состояния технологического оборудования.

Указанные задачи решаются на основании анализа условий работы технологического оборудования, выявленных законов и критериев управления объектом, а также требований, предъявляемых к точности стабилизации, контроля и регистрации технологических параметров, к качеству регулирования и надежности.

Функциональные задачи автоматизации, как правило, реализуются с помощью технических средств, включающих в себя: отборные устройства, средства получения первичной информации, средства преобразования и переработки информации, средства представления и выдачи информации обслуживающему персоналу, комбинированные, комплектные и вспомогательные устройства.

Результатом составления функциональных схем являются:

- 1) выбор методов измерения технологических параметров;
- 2) выбор основных технических средств автоматизации, наиболее полно отвечающих предъявляемым требованиям и условиям работы автоматизируемого объекта;

- 3) определение приводов исполнительных механизмов регулирующих и запорных органов технологического оборудования, управляемого автоматически или дистанционно;
- 4) размещение средств автоматизации на щитах, пультах, технологическом оборудовании и трубопроводах и т.п. и определение способов представления информации о состоянии технологического процесса и оборудования.

Современное развитие всех отраслей промышленности характеризуется большим разнообразием используемых в них технологических процессов.

Практически не ограничены и условия их функционирования и требования по управлению и автоматизации. Однако, базируясь на опыте проектирования систем управления и автоматизации, можно сформулировать некоторые общие принципы, которыми следует руководствоваться при разработке функциональных схем автоматизации:

- 1) уровень автоматизации технологического процесса в каждый период времени должен определяться не только целесообразностью внедрения определенного комплекса технических средств и достигнутым уровнем научно-технических разработок, но и перспективой модернизации и развития технологических процессов. Должна сохраняться возможность наращивания функций управления;

- 2) при разработке функциональных и других видов схем автоматизации и выборе технических средств должны учитываться: вид и характер технологического процесса, условия пожаро - и взрывоопасное, агрессивность и токсичность окружающей среды и т.д.; параметры и физико-химические свойства измеряемой среды; расстояние от мест установки датчиков, вспомогательных устройств, исполнительных механизмов, приводов машин и запорных органов до пунктов управления и контроля; требуемая точность и быстродействие средств автоматизации;

- 3) система автоматизации технологических процессов должна строиться, как правило, на базе серийно выпускаемых средств автоматизации и вычислительной техники. Необходимо стремиться к применению однотипных средств автоматизации и предпочтительно унифицированных систем, характеризуемых простотой сочетания, взаимозаменяемостью и удобством компоновки на щитах управления. Использование однотипной аппаратуры дает значительные преимущества при монтаже, наладке, эксплуатации, обеспечении запасными частями и т. п.

- 4) в качестве локальных средств сбора и накопления первичной информации (автоматических датчиков), вторичных приборов, регулирующих и исполнительных устройств следует использовать преимущественно приборы и средства автоматизации Государственной системы промышленных приборов (ГСП);

- 5) в случаях, когда функциональные схемы автоматизации не могут быть построены на базе только серийной аппаратуры, в процессе проектирования выдаются соответствующие технические задания на разработку новых средств автоматизации;

- 6) выбор средств автоматизации, использующих вспомогательную энергию (электрическую, пневматическую и гидравлическую), определяется условиями пожаро- и взрывоопасное автоматизируемого объекта, агрессивности окружающей среды, требованиями к быстродействию, дальности передачи сигналов информации и управления и т.д.;

- 7) количество приборов, аппаратуры управления и сигнализации, устанавливаемой на оперативных щитах и пультах, должно быть ограничено. Избыток аппаратуры усложняет эксплуатацию, отвлекает внимание обслуживающего персонала от наблюдения за основными приборами, определяющими ход технологического процесса, увеличивает стоимость установки и сроки монтажных и наладочных работ. Приборы и средства автоматизации вспомогательного назначения целесообразнее размещать на отдельных щитах, располагаемых в производственных помещениях вблизи технологического оборудования.

Перечисленные принципы являются общими, но не исчерпывающими для всех случаев, которые могут встретиться в практике проектирования систем автоматизации технологических процессов. Однако для каждого конкретного случая их следует иметь в виду при реализации технического задания на автоматизацию проектируемого объекта.

Приборы, средства автоматизации, электрические устройства и элементы вычислительной техники на функциональных схемах автоматизации показывают в соответствии с действующим ГОСТ 21.404-85.

В отдельных случаях при отсутствии в стандартах необходимых изображений могут быть использованы нестандартные изображения, которые, выполняют на основе характерных признаков изображаемых устройств.

В ГОСТ 21.404-85 принята система обозначений по функциональному признаку, выполняемому данным прибором или средством автоматизации.

Первичные измерительные преобразователи, отборные и приемные устройства, встраиваемые в технологические аппараты и трубопроводы (бобышки, карманы, расширители и т.п.), на функциональных схемах автоматизации не показывают.

Ряд приемных устройств по своей конструкции и принципу действия не требуют непосредственного контактирования с измеряемой средой (радиоактивные устройства — коллиматоры, видеоприемные устройства и т.п.). Их устанавливают и соответственно изображают на функциональных схемах в непосредственной близости от объекта измерения.

Регуляторы прямого действия изображают как совокупность отборного устройства (или первичного преобразователя), линии связи и регулирующего органа (рис. 2.1, а).

Изображение комплектов приборов и средств автоматизации на функциональных схемах может быть выполнено упрощенным или развернутым способом.

Упрощенный способ применяют в основном для изображения приборов и средств автоматизации на технологических схемах. При упрощенном способе на схемах не показывают первичные измерительные преобразователи и всю вспомогательную аппаратуру. Приборы и средства автоматизации, осуществляющие сложные функции (контроль, регулирование, сигнализацию и т.п.) и выполненные в виде отдельных блоков, изображают одним условным графическим обозначением.

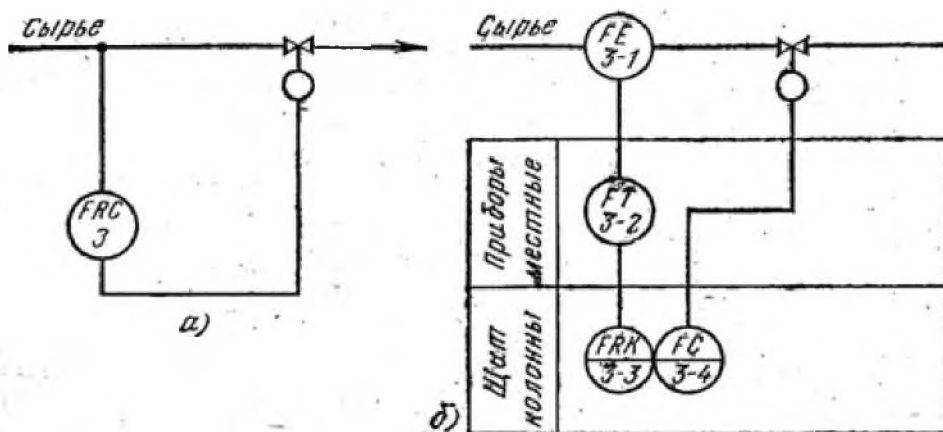


Рис. 1.1 Примеры изображения условных обозначений приборов и средств автоматизации упрощенным (а) и развернутым (б) способами

Развернутый способ применяют для выполнения функциональных схем автоматизации, когда каждый прибор или блок, входящий в единый измерительный, регулирующий или управляющий комплект, показывают отдельным условным графическим изображением.

*Пример 1.* На рис.1.1,а изображен участок технологического трубопровода, на котором упрощенным способом показан функциональный узел автоматического регулирования расхода технологического сырья. Первичный измерительный преобразователь (диафрагма или сопло) в данном случае не показан. Место установки первичного преобразователя обозначено пересечением линий технологического трубопровода с линией, связывающей этот преобразователь с условным обозначением прибора, осуществляющего сложные функции. На рис. 1.1,б изображен тот же узел, что и на рис. 1.1,а, но только развернутым способом.

В системах технологического контроля и управления часто применяют комбинированные и комплексные устройства, например комбинированные измерительные и регулирующие приборы, машины централизованного контроля, полуккомплекты телемеханики, устройства телевидения и т. -п. Такие устройства обозначают прямоугольником произвольных размеров с указанием внутри прямоугольника типа устройства по документации завода-изготовителя.

### Позиционные обозначения приборов и средств автоматизации

Всем приборам и средствам автоматизации, изображенным на функциональных схемах автоматизации, присваивают позиционные обозначения (позиции), сохраняющиеся во всех материалах проекта. На стадии проекта позиционные обозначения выполняют арабскими цифрами в соответствии с нумерацией в заявочной ведомости приборов, средств автоматизации и электроаппаратуры. На стадии рабочей документации и при одностадийном проектировании позиционные обозначения приборов и средств автоматизации образуются из двух частей: арабских цифр — номера функциональной группы и строчных букв русского алфавита — номера прибора и средств автоматизации в данной функциональной группе.

Буквенные обозначения присваивают каждому элементу функциональной группы в порядке алфавита в зависимости от последовательности прохождения сигнала — от устройств получения информации к устройствам воздействия на управляемый процесс (например, приемное устройство-датчик, вторичный преобразователь, задатчик, регулятор, указатель положения, исполнительный механизм, регулирующий орган).

Позиционные обозначения отдельных приборов и средств автоматизации, таких как регулятор прямого действия, манометр, термометр и т.п., состоят только из порядковых номеров.

Позиционные обозначения присваивают всем элементам функциональных групп, за исключением:

- а) отборных устройств;
- б) приборов и средств автоматизации, поставляемых комплектно с технологическим оборудованием;
- в) регулирующих органов и исполнительных механизмов, входящих в данную автоматическую систему управления, но заказываемых и устанавливаемых в технологических частях проектов.

Показанную на функциональных схемах автоматизации электроаппаратуру на стадии рабочего проекта при одностадийном проектировании обозначают индексами, принятыми в принципиальных электрических схемах.

При определении границ каждой функциональной группы необходимо учитывать следующее обстоятельство: если какой-либо прибор или регулятор связан с несколькими датчиками или получает, дополнительные воздействия по другим параметрам (например, корректирующий сигнал), то все элементы схемы, осуществляющие дополнительные функции, относятся к той функциональной группе, на которую оказывается воздействие.

В системах централизованного контроля с применением вычислительной техники, в схемах телеизмерения, а также в сложных схемах автоматического управления с

общими для разных функциональных групп устройствами все общие элементы выносятся в самостоятельные функциональные группы.

Позиционные обозначения в функциональных схемах автоматизации проставляют, как правило, в нижней части окружности, обозначающей прибор, или рядом с условными графическими обозначениями приборов и средств автоматизации с правой стороны или над ним.

#### Выполнение функциональных схем автоматизации

Функциональные схемы автоматизации разрабатывают с большей или меньшей степенью детализации. Однако объем информации, представленной на схеме, как правило, обеспечивает полное представление о принятых основных решениях по автоматизации данного технологического процесса и возможность составления на стадии проекта заявочных ведомостей приборов и средств автоматизации, трубопроводной арматуры, щитов и пультов, основных монтажных материалов и изделий, а на стадии рабочей документации — всего комплекса проектных материалов, предусмотренных в составе проекта.

Функциональные схемы автоматизации могут быть выполнены двумя способами:

1) с изображением щитов и пультов управления при помощи условных прямоугольников (как правило, в нижней части чертежа), в пределах которых указывают устанавливаемые на них средства автоматизации;

2) с изображением средств автоматизации на технологических схемах вблизи отборных и приемных устройств без построения прямоугольников, условно изображающих щиты, пульта, пункты контроля и управления.

При выполнении схемы по первому способу на ней показывают все приборы и средства автоматизации, входящие в состав функционального блока или группы, а также место их установки. Преимуществом этого способа является большая наглядность, в значительной степени облегчающая чтение схемы и работу с проектными материалами.

Приборы и средства автоматизации, встраиваемые в технологическое оборудование и коммуникации или механически связанные с ними, изображают на чертеже в непосредственной близости от них. К таким средствам автоматизации относятся: отборные устройства, датчики, воспринимающие воздействие измеряемых и регулируемых величин (измерительные сужающие устройства, ротаметры, счетчики и т.п.), исполнительные механизмы, регулирующие и запорные органы.

Прямоугольники щитов и пультов располагают в такой последовательности, чтобы при размещении в их пределах обозначений приборов и средств автоматизации обеспечивалась наибольшая простота и ясность схемы и минимум пересечений линий связи. В прямоугольниках могут быть даны номера чертежей общих видов щитов и пультов. В каждом прямоугольнике с левой стороны указывают его наименование.

Приборы и средства автоматизации, которые расположены вне щитов и не связаны непосредственно с технологическим оборудованием и трубопроводами, условно показывают в прямоугольнике «Приборы местные».

Для облегчения понимания существа автоматизируемого объекта и возможности выбора диапазона измерения и шкал приборов, а также уставок регуляторов на участках линий связи над верхним прямоугольником («Приборы местные») указывают предельные рабочие (максимальные и минимальные) значения измеряемых или регулируемых технологических параметров при установившихся режимах работы. Эти значения дают в единицах шкалы выбираемого прибора или в международной системе единиц без буквенных обозначений.

На схемах автоматизации с правой стороны чертежа приводят необходимые пояснения, например на основании каких документов разработаны схемы автоматизации, краткую техническую характеристику автоматизируемого объекта, таблицы, диаграммы и т.п.

Над основной подписью по ее ширине сверху вниз на первом листе схем в необходимых случаях помещают таблицу условных обозначений, не предусмотренных стандартами. В отдельных случаях таблицы нестандартизированных условных обозначений могут быть выполнены на отдельных листах формата А4.

Пояснительный текст располагают обычно над таблицей условных обозначений (или над основной надписью) или в другом свободном месте.

Контуры технологического оборудования на схемах автоматизации выполняют обычно линиями толщиной - 0,6...1,5 мм, трубопроводные коммуникации - 0,6...1,5 мм, приборы и средства автоматизации - 0,5...0,6 мм, линии связи - 0,2...0,3 мм, прямоугольники, изображающие щиты и пульты - 0,6...1,5 мм.

*Пример 2.* На рис.1.2 приведен пример схем автоматизации, выполненных по первому способу.

В схеме двумя прямоугольниками обозначены «Приборы местные» и «Щит колонны». Линии связи между датчиками и отборными устройствами, установленными на технологическом оборудовании, и приборами и средствами автоматизации, установленными по месту и на щите колонны, выполнены с разрывами. На линиях связи над прямоугольником «Приборы местные» указаны предельные рабочие значения измеряемых и регулируемых параметров (м<sup>3</sup>/ч, мм, МПа, ..., мг/л).

Все комплекты аппаратуры контроля и автоматизации имеют цифровое позиционное обозначение. Например, регулирование расхода сырья осуществляется комплектом аппаратуры, состоящим из диафрагмы 3-1, бесшкального дифманометра и регулирующего прибора для измерения расхода 3-3, снабженного станцией управления 34, установленной на щите, и исполнительного механизма 3-5. Комплекту присвоен номер 3, а его составным элементам через дефис — цифровые индексы 1-3, 5. Комплект для измерения давления в колонне имеет номер 2 и т. д.

В схеме двумя прямоугольниками обозначены «Приборы местные» и «Щит колонны». Линии связи между датчиками и отборными устройствами, установленными на технологическом оборудовании, и приборами и средствами автоматизации, установленными по месту и на щите колонны, выполнены с разрывами.

При построении схем по второму способу, хотя он и дает только общее представление о принятых решениях по автоматизации объекта, достигается сокращение объема документации. При втором способе позиционные обозначения элементов схемы в каждом контуре регулирования выполняют арабскими цифрами, а исполнительные механизмы обозначения не имеют.



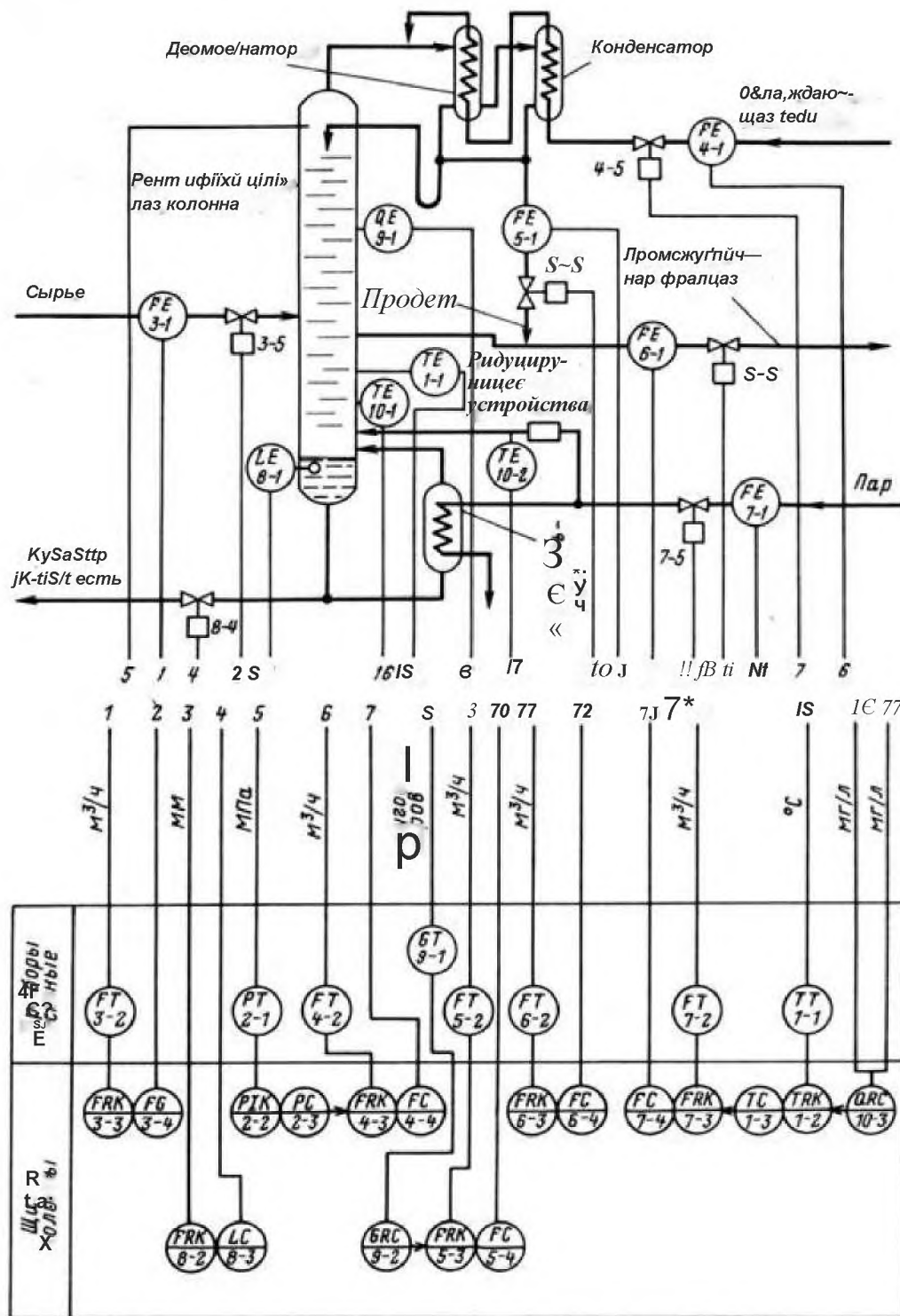


Рис. 1.2 Пример выполнения функциональной схемы автоматизации по первому способу с изображением приборов по ГОСТ 21.404-85

*Пример 3.* На рис.1.3 приведена схема автоматизации, выполненная по второму способу. Регулирующие устройства изображены на схеме технологического процесса вблизи отборных устройств и датчиков и обозначены соответствующими арабскими цифрами, которые проставлены в нижней части окружности, изображающей регулирующее устройство. Исполнительные механизмы и отборные устройства обозначений не имеют.

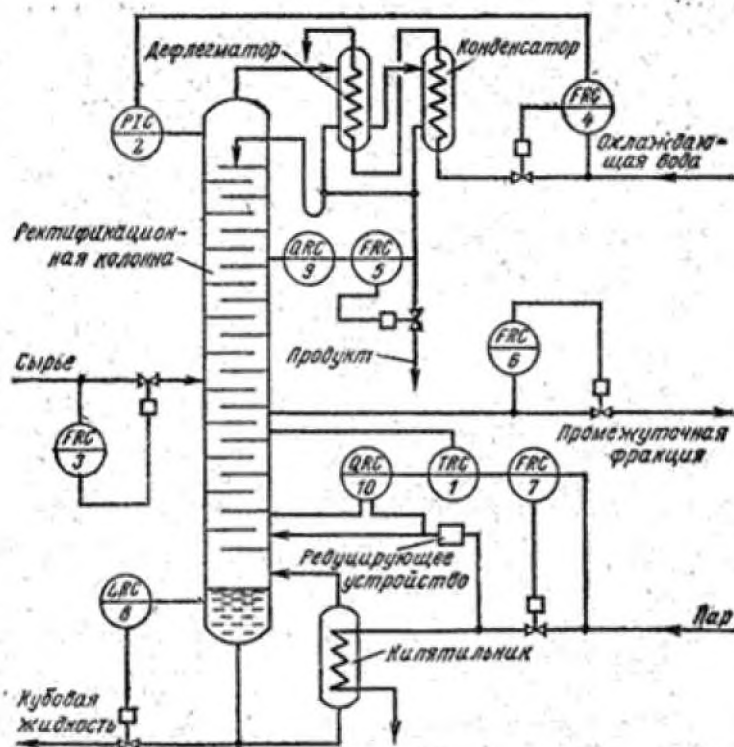


Рис. 1.3 Пример выполнения функциональной схемы автоматизации по второму способу

Последовательность чтения функциональных схем автоматизации

Для работы по схемам автоматизации необходимо иметь пояснительную записку к проекту, опись чертежей и спецификацию на приборы, средства автоматизации, электроаппаратуру и запорную арматуру.

При чтении схем автоматизации рекомендуется соблюдать следующую последовательность:

- 1) прочитать все надписи — основную надпись (штамп), примечания, ссылки на относящиеся чертежи и другие дополнительные пояснения, имеющиеся на чертеже;
- 2) изучить технологический процесс и взаимодействие всех участвующих в нем аппаратов, агрегатов и установок, начиная с ознакомления с пояснительными записками к проекту автоматизации и технологической части;
- 3) определить организацию пунктов контроля и управления данным технологическим процессом;
- 4) установить перечень узлов контроля, сигнализации и автоматического регулирования и управления электроприводами, предусмотренных данной схемой.

При этом с помощью спецификаций на приборы и средства автоматизации, электроаппаратуру и запорную арматуру выявляют:

- технические средства, с помощью которых реализуются эти узлы;
- характер взаимодействия отдельных технических средств автоматики с элементами технологического оборудования;
- связь узлов данной схемы автоматизации между собой и с узлами других схем;
- номер чертежа принципиальной схемы каждого узла.

Номера чертежей, относящихся к данной схеме автоматизации, устанавливают по описи чертежей и пояснительной записке к проекту автоматизации. Встречаются случаи выполнения чертежей схем автоматизации, когда номер чертежа принципиальной схемы указывается на линии связи, соединяющей регулирующее устройство с исполнительным механизмом.

Получаемая в результате изучения структурных и функциональных схем автоматизации информация дает общее представление об автоматизируемом объекте и позволяет перейти к изучению принципиальных схем отдельных функциональных узлов.

### **Практическая часть**

1. По предложенным исходным данным построить функциональную схему автоматизации.
2. Выбрать методы измерения технологических параметров.
3. Выбрать технические средства автоматизации.
4. Определить приводы исполнительных механизмов регулирующих и запорных органов технологического оборудования.
5. Определить положение ТСА на щитах, пультах, технологическом оборудовании и трубопроводах и т. п.

### **Контрольные вопросы**

1. Что представляет собой функциональная схема автоматизации?
2. Какие сведения можно получить при прочтении функциональной схемы автоматизации?
3. Какие способы могут быть применены при изображении элементов и средств автоматизации на функциональных схемах автоматизации?
4. Какую последовательность рекомендуется соблюдать при чтении схем автоматизации?

## Практическая работа №2

**Тема:** Изучение принципа действия предохранительных сбросных устройств

**Цель:** Выявить особенности устройства и настройки разных типов предохранительных сбросных устройств.

### Теоретическая часть

Предохранительно-сбросные устройства (ПСУ) предназначены для сброса газа в атмосферу в случае повышения его давления за регулятором не более, чем на 15% от рабочего.

ПСУ бывают трех типов:

- жидкостные;
- мембранные;
- пружинные.

**Жидкостные ПСУ** применяются только на ГП низкого давления газа (до 500 мм в.ст.).

Жидкостной ПСУ представляет собой сварную конструкцию в виде трубы  $\varnothing 219$ мм. Высота определяется в зависимости от давления газа в газопроводе. Труба заглушена с двух сторон, т.е. образована емкость. В емкости имеется трубка, которая соединяется с выходным контролируемым давлением газа. В верхней части этого ПСУ врезан патрубок, предназначенный для сброса газа в атмосферу. ПСУ заливается водой или другой жидкостью с поправкой на плотность этой жидкости. Уровень жидкости определяется расчетом в зависимости от давления в газопроводе. Сверху на воду заливается слой масла для предотвращения испарения воды.

Снизу ПСУ имеется кран, предназначенный для слива воды при настройке его заданное давление. В верхней части имеется воронка для залива воды.

Настройка ПСУ на заданное давление:

1. Залить в ПСУ максимально возможное количество воды.
2. Регулятором по манометру на выходе установить то давление, при котором ПСУ должно будет сбросить газ в атмосферу в случае аварийного повышения давления газа за регулятором не более, чем на 15% от  $P_{раб}$ .
3. Открывая кран снизу ПСУ, медленно сливаем воду до момента, когда начнется сброс газа в атмосферу, кран закрываем. Начало сброса определяем по бульканию воды.

**ПСУ мембранного типа** устанавливаются на ГП среднего и низкого давлений.

Состоит из корпуса и крышки, между которыми зажата мембрана, непосредственно связанная с клапаном в верхней ее части. Клапан перекрывает седло корпуса, когда сброса газа не происходит. Снизу на мембрану воздействует сила регулировочной настроечной пружины. Корпус имеет два патрубка: входной, связанный через импульсную трубку с контролируемым давлением газа, и выходной, предназначенный для сброса газа в атмосферу.

Диаметр сбросного патрубка этого клапана ПСК-50 (рис. 3.1) равен 50мм, поэтому сбросной трубопровод, присоединяемый к нему, тоже должен быть не менее диаметра присоединительного патрубка, т.е. не менее 50 мм. Это общетехническое правило.

Сверху на мембрану воздействует входное контролируемое давление газа. При повышении давления газа в контролируемом газопроводе это повышенное давление по импульсной трубке поступает в надмембранную полость. При этом мембрана прогибается вниз, тянет за собой клапан, обеспечивая сброс газа в атмосферу.

Настройка на заданный режим:

1. Максимально сжать настроечную пружину, не разрушая уплотнительную резину клапана острыми краями.
2. Регулятором по манометру на выходе устанавливаем то давление, при котором клапан должен открыться и обеспечить сброс газа в атмосферу.
3. Медленно ослабляем пружину до тех пор, пока не начнется сброс газа в атмосферу.

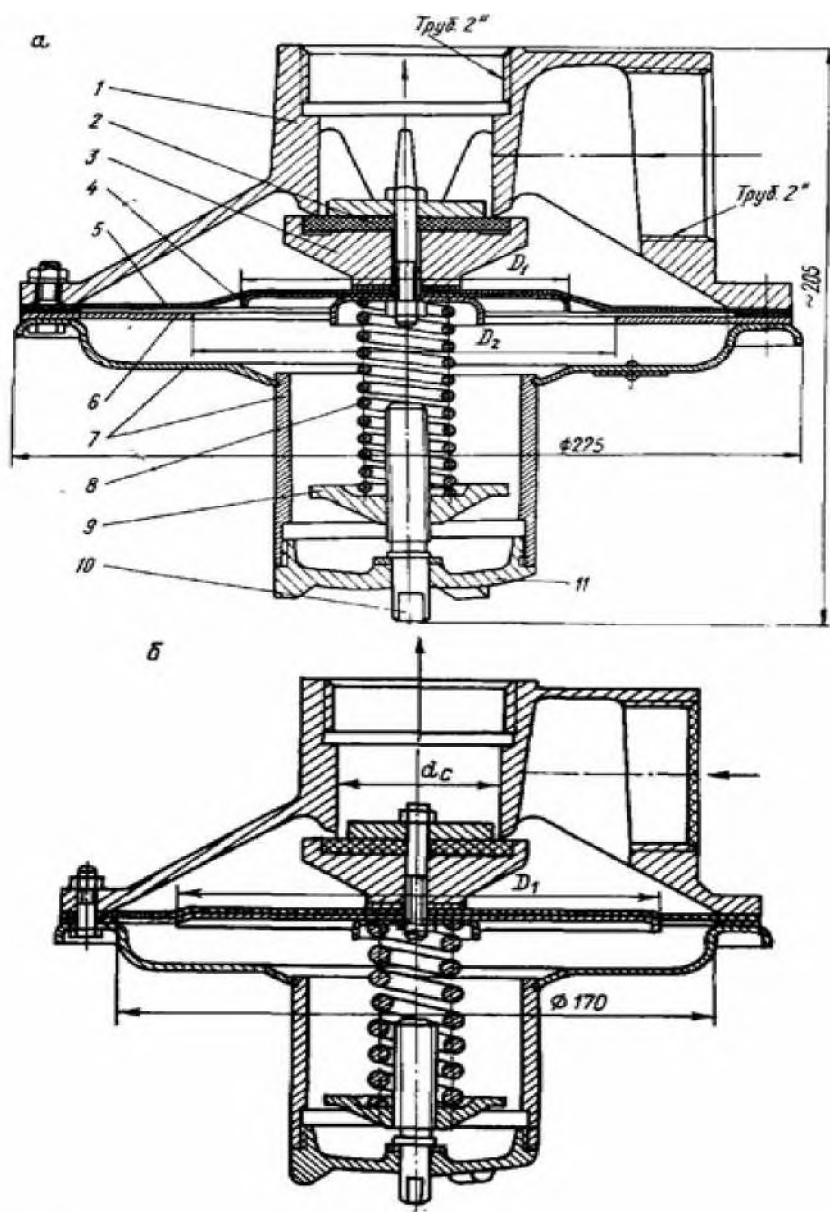


Рис. 3.1 Предохранительное сбросное устройство типа ПСК-50 с направляющими ребрами (а) и без них (б)  
 1 - корпус; 2 - седло; 3 - клапан; 4 - диск; 5 - мембрана; 6 - кольцо; 7 - крышка; 8 - настроечная пружина; 9 -  
 нажимная гайка; 10 - регулировочный винт; 11 - крышка стакана.

**ПСУ пружинного типа** предназначены для установки на газопроводах среднего и высокого давления.

Рассмотрим сбросной предохранительный полноподъемный клапан (СППК) двухпозиционного действия на  $P_y=16 \text{ кгс/см}^2$  (рис. 3.2).

Сбросной предохранительный клапан СШ1К состоит из корпуса с двумя патрубками. Снизу входной сопловидный патрубок, сбоку - патрубок для сброса газа в атмосферу. В корпусе имеется сменное седло, направляющая втулка, в которой расположен клапан, соединенный со штоком, на котором находится регулировочная настроечная пружина под крышкой, прикрепленной к корпусу. В верхней части штока имеется кулачковый механизм с рычагом, предназначенный для подрыва клапана вручную, т.е. проверки его на срабатывание. В верхней части штока имеется специальная гайка, с помощью которой регулируется усилие пружины. Гайка и кулачковый механизм находятся под колпаком.

На направляющей втулке в корпусе (в нижней его части) накручена верхняя регулировочная гайка на резьбе, предназначенная для преобразования реактивной силы и более быстрого срабатывания (т.е. открытия клапана).

На сменном седле накручена нижняя регулировочная гайка, предназначенная для более быстрой посадки клапана на седло в случае снижения давления газа.

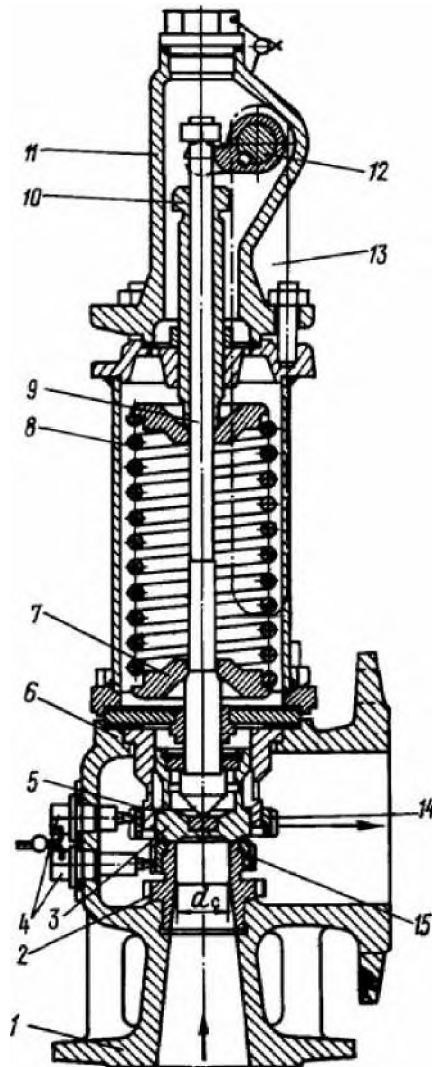


Рис. 2.36. Пружинное ПСУ СППК4Р.

1 — входной патрубок; 2 — седло; 3 — клапан; 4 — стопорные болты; 5 — направляющая втулка; 6 — корпус; 7 — опорная шайба; 8 — настроечная пружина; 9 — шток; 10 — регулировочный винт; 11 — защитный колпак; 12 — кулачковый механизм; 13 — рычаг; 14—15 — регулировочные гайки (14 — верхняя, 15 — нижняя).

Рис. 3.2 Пружинное ПСУ СППК4Р.

1 - входной патрубок; 2 - седло; 3 - клапан; 4 - стопорные болты; 5 - направляющая втулка; 6 - корпус; 7 - опорная шайба; 8 - настроечная пружина; 9 - шток; 10 - регулировочный винт; 11 - защитный колпак; 12 - кулачковый механизм; 13 - рычаг; 14-15 - регулировочные гайки (14 - верхняя, 15 - нижняя).

При увеличении давления газа за регулятором не более 15% от  $P_{раб.}$  это повышенное давление действует на клапан, который поднимается во втулке пропорционально растущему давлению. Это первая позиция работы клапана. По мере подъема клапана в направляющей втулке, поток газа меняет свое направление на противоположное, вследствие чего образуется реактивная сила. Теперь на клапан действуют уже две силы: сила статического давления газа и реактивная сила. Клапан быстро поднимается на полную величину, обеспечивая быстрый сброс газа в атмосферу. Это вторая позиция работы клапана.

Основные неисправности СППК:

1. Негерметичность прилегания клапана к седлу. Причины - те же.

2. Пружина от времени потеряла свои упругие свойства.
3. Утечки газа через фланцевые соединения, микропоры, микротрещины в корпусе.

Настройка С1111К на заданный режим производится следующим образом:

1. Максимально сжать пружину клапана.
2. Регулятором по манометру на выходе установить то давление газа, при котором СППК начал бы сброс его в атмосферу.
3. Ослабить пружину клапана СППК до начала сброса газа в атмосферу. Когда начнется сброс, прекратить регулировку.

После настройки клапана снижаем регулятором давление до рабочего. Клапан при этом давлении прижат пружиной к седлу, т.е. при нормальной работе ГРП все предохранительносбросные устройства находятся в закрытом положении, и сброса газа через них нет.

### **Практическая часть**

1. Изучить теоретическую часть практической работы.
2. По ее материалам заполнить таблицу 2.

Таблица 2

Типы ПСУ, их устройства и принцип действия

| Тип ПСУ | Назначение | Устройство | Настройка |
|---------|------------|------------|-----------|
|         |            |            |           |
|         |            |            |           |
|         |            |            |           |

### **Контрольные вопросы**

1. Для чего служат ПСУ?
2. Каких типов бывают ПСУ?
3. Принцип действия жидкостных ПСУ?
4. Принцип действия мембранного типа?
5. Принцип действия пружинного типа?
6. Основные неисправности СППК?
7. Как производится настройка СППК на заданный режим?

## Практическая работа №7

**Тема:** Изучение принципов построения автоматизированных систем управления

**Цель:** Выявить цели и принципы построения автоматизированных систем управления

### Теоретическая часть

Информация непосредственно и неразрывно связана с процессом управления. Самое общее кибернетическое определение управления гласит: управление есть процесс целенаправленной переработки информации.

Управление определяется как функция системы, обеспечивающая либо сохранение совокупности ее основных свойств, либо ее развитие в заданном направлении. И в том и в другом случае управление осуществляется для достижения определенной цели. В системе управления можно выделить две подсистемы: управляющую и управляемую. Первая осуществляет собственно функции управления, вторая является объектом управления.

**Автоматизированная система управления (АСУ)** - это комплекс технических и программных средств, совместно с организационными структурами (отдельными людьми и коллективом), обеспечивающий управление объектом (комплексом) в производственной, научной или общественной среде.

Цель разработки и внедрения АСУ:

- повышение эффективности принимаемых решений, особенно в части наилучшего использования всех видов ресурсов и сокращения потерь, достигаемых за счет обеспечения процесса принятия решений своевременной, полной и точной информацией, а также применения математических методов оптимизации;
- повышение производительности труда инженерно-технического и управленческого персонала (и его сокращение) за счет выполнения основного объема учетных и расчетных задач на ЭВМ.

Кроме того, внедрение АСУ обычно приводит к совершенствованию организационных структур и методов управления, более гибкой регламентации документооборота и процедур управления, упорядочению использования и создания нормативов, совершенствованию организации производства.

**Важнейшими принципами построения эффективных АСУ являются:**

**Принцип интеграции**, заключающийся в том, что обрабатываемые данные, однажды введенные в АСУ (базы данных), многократно используются для решения большого числа задач, при этом устраняется дублирование данных и операций их преобразования.

**Принцип системности**, заключающийся в обработке данных в различных разрезах, чтобы получить информацию, необходимую для принятия решения на всех уровнях и во всех функциональных подсистемах управления;

**Принцип комплексности**, подразумевающий механизацию и автоматизацию процедур преобразования данных на всех стадиях техпроцесса АСУ.

АСУ подразделяются по функциям:

- административно-организационные (например, системы управления предприятием - АСУП, отраслевые системы управления - ОАСУ);
- технологическими (автоматизированные системы управления технологическими процессами - АСУТП, в свою очередь подразделяющиеся на гибкие производственные системы - ГПС, автоматизированные системы контроля качества продукции - АСК, системы управления станками и линиями с числовым программным управлением - ЧПУ);
- интегрированные, объединяющие функции перечисленных АСУ в различных комбинациях.

**Теория автоматического управления (ТАУ)** - наука о принципах построения, методах расчета и исследования автоматических систем.

ТАУ рассматривает класс систем, основой функционирования которых является процесс преобразования энергии (в отличие от информационных систем - преобразующих информацию).



**Системой автоматического управления (САУ)** называется совокупность управляемого объекта и устройства управления, взаимодействующих в соответствии с заданным законом (алгоритмом) управления.

Типовая, структурная схема системы автоматического управления приведена на рисунке

Управлением в технических системах называется преднамеренное воздействие на управляемый объект, обеспечивающее достижение поставленной цели.

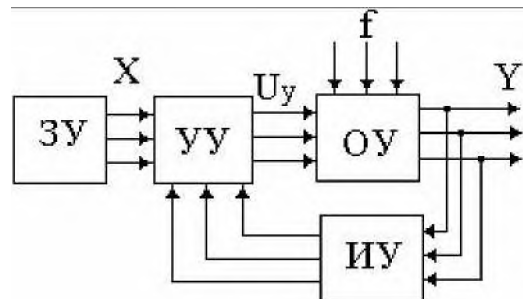


Рис. 7.1 Система автоматического управления

САУ подразделяются:

1. По характеру изменения выходной величины:

- системы автоматического регулирования (САР, стабилизации) - системы, в которых выходная величина поддерживается на постоянном уровне, определенном заранее;
- следящие системы - это системы, в которых выходная величина изменяется в соответствии с заранее неизвестной функцией, определяемой заданием;
- программные системы - это системы, в которых выходная величина изменяется в соответствии с программой определяемой заданием;
- экстремальные системы - это системы, в которых выходная величина поддерживается на уровне некоторого экстремума;
- оптимальные системы - это системы, в которых выход таков, что некоторый показатель наилучший в определенном смысле.

2. По принципу управления:

- системы с управлением по отклонению - системы, в которых управляющее воздействие вырабатывается в функции разности задающего и возмущающего воздействия. Этот принцип используется в замкнутых системах управления.
- системы с управлением по возмущению - системы, в которых управляющее воздействие вырабатывается в функции задающего или возмущающего воздействия. Этот принцип управления чаще всего используется в разомкнутых системах.
- системы скомбинированным управлением - системы, в которых сочетается первый и второй принципы управления.

### Практическая часть

1. Определите цели построения АСУ.
2. Определите основные принципы построения АСУ.
3. Привести примеры известных вам систем контроля, регулирования и управления. В качестве примера взять параметр: температура.

### Контрольные вопросы

- 1 Что такое АСУ?
- 2 Что изучает ТАУ?
- 3 Что такое САР?
- 4 Что такое САУ?
- 5 Принципы управления?

## Список использованных источников

1. ГОСТ 21.404–85. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 8 с.
2. ГОСТ 2.701–84 ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению: Справ. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 315 с.
3. ГОСТ 2.721–74 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 86 с.
4. Дятлова Е.П., Сафонова М.Р. Проектирование автоматизированных систем управления технологическими процессами ЦТП: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГТУРП, 1999. – 51 с.
5. Ключев А. С. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: справ. пособие / А. С. Ключев, В. В. Глазов, А. Х. Дубровский. – М. : Энергия, 1980. – 512 с.
6. Кулаков, М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств : учеб. для вузов / М. В. Кулаков. – М. : Машиностроение, 1983. – 423 с.
7. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения» / Владим. гос. ун-т ; сост.: К. И. Зуев, В. И. Тарасенко. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2014. – 68 с.
8. Попкович, Г. С. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения : учеб. для вузов / Г. С. Попкович, М. А. Гордеев. – М. : Высш. шк., 1986. – 392 с.
9. Пособие по проектированию автоматизации и диспетчеризации систем водоснабжения (к СНиП 2.04.02-84) / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП, 1985. – 32 с.

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В. И. ВЕРНАДСКОГО»**

**АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ**

**ФАКУЛЬТЕТ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭНЕРГЕТИКИ**

**МЕТОДОЛОГИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И  
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Методические указания**

по выполнению практических занятий

направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства,  
направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны  
водных ресурсов»

Симферополь

2019

Методология планирования экспериментов и математическая обработка экспериментальных исследований: Методические указания к практическим занятиям для обучающихся направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов». – Симферополь, 2019. – 42 с.

Методические указания предназначены для обучающихся по направлению подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» при изучении дисциплины «Методология планирования экспериментов и математическая обработка экспериментальных исследований».

Составитель: Николенко И.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники.

Утверждено на заседании учебно-методической комиссии факультета водных ресурсов и энергетики от 24 апреля 2019 года, протокол № 8.

Одобрено на заседании кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники от 17 апреля 2019 года, протокол № 17.

© Николенко И.В., 2019

©ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского», АСиА, 2019

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Принятие проектных решений в машиностроении и оценка их качества в основном осуществляется на основании данных эксперимента. А усложнение объектов испытания вызывает резкое повышение стоимости их исследования. Поэтому задача извлечения наибольшего объема информации об изучаемых процессах или устройствах при ограничениях по затратам является достаточно актуальной.

Измерение любой экспериментальной величины всегда осуществляется при воздействии некоторых помех, которые, несмотря на стремление исследователя свести их к минимуму, никогда не могут быть полностью устранены. Необходимость применения аппарата математической статистики при обработке результатов измерений, где случайная составляющая соизмерима с самими результатами, очевидна, и соответствующие методы обработки уже давно используются в экспериментальной практике.

Долгое время внимание математической статистики было обращено к совершенствованию методов обработки при заданном способе проведения эксперимента. Выбор самого эксперимента, т. е. как, где и когда проводить измерения, определялся в основном интуицией экспериментатора.

Усложнение эксперимента установок вызвало резкое повышение стоимости экспериментальных исследований. В связи с этим оказывается совершенно необходимым широкое применение методов, которые не только давали бы способ обработки экспериментальных данных, но и позволяли бы, оптимальным образом организовывать эксперимент.

Отметим, что планирование целесообразно лишь в тех случаях, когда экспериментатор четко представляет конечную цель проводимого исследования.

К настоящему времени можно выделить два основных направления в математической теории планирования экспериментов: планирование экстремальных экспериментов и планирование экспериментов по выяснению механизма явлений.

Планирование первого типа применяется в тех случаях, когда экспериментатора интересуют условия, при которых изучаемый процесс удовлетворяет некоторому критерию оптимальности. Например, при разработке новых технологических процессов критерий оптимальности состоит в требовании максимальной повысить производительность процесса. Планирование при этом заключается в поиске таких значений режимов процесса, при которых выполняется поставленное требование.

Нередко экспериментатору необходимо выяснить поведение исследуемого объекта в целом, т.е. выяснить механизм явления. Например, при изучении химико-технологического процесса может возникнуть необходимость выяснить зависимость выхода продукта реакции от температуры, давления, реагентов и т. д. На языке математики задача подобного рода формулируется следующим образом:

необходимо найти такую функцию, которая определяет связь между выходом продукта реакции и величинами, влияющими на ход реакции (температура, процентное содержание реагентов и т. д.), или более кратко: найти математическую модель данного процесса.

Таким образом, под выяснением механизма явления здесь, в отличие от обычного использования данного термина, подразумевается не прямое исследование взаимодействий на уровне элементарных частиц, молекул и т. п., а изучение феноменологической стороны явления. Иными словами, нам безразлично, например, каким образом взаимодействуют две молекулы, а важна лишь зависимость выхода какого-либо продукта от процентного содержания реагентов, которая соответствует этому взаимодействию и которая может непосредственно измеряться в данном эксперименте.

Получив математический вид зависимости некоторой величины от соответствующих факторов, мы тем самым получили информацию, на основе которой мы как специалисты данной отрасли науки, привлекая необходимый теоретический аппарат, можем сделать выводы о конкретном виде элементарных взаимодействий.

Более подробно рассмотрим процесс поиска математической модели, представленный на рис. 1.



Рис. 1. Процесс поиска математической модели

Блок 1 соответствует экспериментальному этапу работы, т.е. техническому осуществлению спланированных ранее опытов. Обычно проведению планируемых экспериментов предшествует некоторая работа, которая позволяет получить

грубую информацию об исследуемом процессе, так как при полном отсутствии априорной информации планирование невозможно.

Следующим этапом работы (блок 2) является вычисление оценок искомых параметров, представление математической модели. После того как предложена модель (процесса, явления и т.д.), необходимо проверить, согласуется ли она с экспериментальными данными (блок 3). Если полученная модель (функция) достаточно хорошо удовлетворяет экспериментальным данным, то в зависимости от обстоятельств эксперимент либо прекращается, либо планируется дополнительный эксперимент по уточнению всей совокупности параметров или некоторой наиболее интересной для экспериментатора их группы (блок 4).

Если полученная модель (функция) не удовлетворяет экспериментальным данным, то возникает необходимость более тщательного анализа происходящих явлений. При отсутствии каких-либо доводов в пользу выдвижения новой модели следует обратиться к планированию уточняющего эксперимента. Если же имеются факты, которые говорят о возможности описания изучаемых явлений некоторой иной по сравнению с первоначальной моделью, то необходимо приступить к планированию эксперимента, который позволил бы выяснить, какая из этих моделей наилучшим образом описывает изучаемый объект (блок 6).

Таким образом, стратегию проведения эксперимента по выяснению математической модели при априорных сведениях, соответствующих уровню 3, можно представить в виде последовательности циклов  $4 - 1 - 2 - 3$  и  $5 - 6 - 1 - 2 - 3$  (см. рис.1). Порядок чередования этих циклов определяется результатами проверки согласия между моделью и данными (блок 3).

Методические указания состоят из 7 практических занятий, в каждом из которых рассмотрен определенный этап планирования эксперимента. Приложение содержит варианты задач. Работая с материалом практических занятий, студент может самостоятельно выбрать объект исследования, согласовав его с преподавателям или воспользоваться вариантами задач, представленными в приложении. Кроме того, для удобства расчетов в приложении содержатся справочные таблицы.

## Практическая работа №1 ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ

**Цель работы:** приобрести знания, умения и навыки проведения дисперсионного анализа.

### Общие положения

Во многих практических задачах на результаты исследования (отклик, выходную величину) часто оказывает влияние целый ряд факторов, действие которых нельзя оценить количественно. Однако исследователя интересует вопрос, насколько существенно влияние того или иного фактора. Пусть, например, какая-либо технологическая операция выполняется параллельно на нескольких станках. Для правильной организации дальнейших этапов технологического процесса необходимо знать, в какой мере однотипными являются средние размеры деталей, получаемых на параллельно работающих станках. При экспериментальных исследованиях, проводимых различными операторами на различном оборудовании, важно изучение влияния двух факторов на результат эксперимента – оператора и оборудования. Если к тому же данные исследования проводились в различное время (или в различных местах), то вводится еще один фактор – время (место) проведения эксперимента. Аналогичная задача возникает при исследовании партий изделий, получаемых от различных поставщиков, при выяснении влияния различных свойств сырья на качество продукции и т. д.

Для выявления степени влияния контролируемых факторов на отклик используют дисперсионный анализ. В зависимости от количества факторов, включенных в анализ, различают однофакторный, двухфакторный и многофакторный дисперсионный анализ.

Проведение дисперсионного анализа возможно, если:

1) выходная величина (отклик) в силу физических свойств зависит от  $N$  факторов (не имеющих количественного описания) и от их парных взаимодействий;

2) каждый фактор можно варьировать на нескольких ( $n$ ) уровнях (эксперимент проводят несколько операторов, применяются различные методы измерения и т. д.);

3) каждую опытную ситуацию можно наблюдать несколько ( $m$ ) раз, т. е. реализуется серия параллельных опытов;

4) выходная величина (отклик) в общем случае является случайной величиной, подчиняющейся нормальному закону распределения с одинаковыми дисперсиями во всех опытах.

Рассмотрим идеальный вариант – случайные воздействия отсутствуют и необходимо исследовать влияние только одного фактора.



Результаты всех измерений удобно представлять в виде таблицы, которую называют матрицей наблюдений (табл. 1).

Таблица 1

Таблица наблюдений

| Номер уровня фактора | Уровень фактора | Наблюдения                                       | Число дублирующих опытов* |
|----------------------|-----------------|--|---------------------------|
| 1                    | $X_1$           | $Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1j}, \dots, Y_{1m_1}$ | $m_1$                     |
| 2                    | $X_2$           | $Y_{21}, Y_{22}, \dots, Y_{2j}, \dots, Y_{2m_2}$ | $m_2$                     |
| 3                    | $X_3$           | $Y_{31}, Y_{32}, \dots, Y_{3j}, \dots, Y_{3m_3}$ | $m_3$                     |
| $i$                  | $X_i$           | $Y_{i1}, Y_{i2}, \dots, Y_{ij}, \dots, Y_{im_i}$ | $m_i$                     |
| $n$                  | $X_n$           | $Y_{n1}, Y_{n2}, \dots, Y_{nj}, \dots, Y_{nm_n}$ | $m_n$                     |

Примечание: \*в рассматриваемом примере считаем, что  $m_i = const$ .

Для каждой серии дублирующих опытов вычисляют дисперсии воспроизводимости  $S_{воспр_i}^2$ :

$$S_{воспр_i}^2 = \frac{1}{m_i - 1} \sum_{j=1}^{m_i} (Y_{ij} - \bar{y}_i)^2, \quad \bar{y}_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} Y_{ij}, \quad f = m - 1,$$

где  $Y_{ij}$  – текущее значение случайной величины;  $\bar{y}_i$  – среднее арифметическое значение;  $f$  – число степеней свободы;  $m$  – число наблюдений (число дублирующих опытов).

Далее, суммируя полученные значения дисперсий, определяют величины  $\sum_{i=1}^n S_{воспр_i}^2$ .

В процессе измерений обычно имеют место резко выделяющиеся («дикие») измерения, вызывающие соответствующее резкое увеличение значения дисперсии воспроизводимости. Для ответа на вопрос, можно ли отбросить «дикие» измерения, осуществляется проверка однородности дисперсий с использованием критерия Кохрена:

$$G_{расч} = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^n S_{воспр_i}^2} < G_{табл},$$

где  $G_{расч}$ ,  $G_{табл}$  – расчетное (опытное) и табличное значения критерия Кохрена (табличные значения представлены в приложении);  $S_{max}^2$  – дисперсия «дикого» измерения.

Если  $G_{расч} < G_{табл}$ , то дисперсии однородны и «дикие» измерения отбрасывать нельзя. Если  $G_{расч} > G_{табл}$ , то «дикие» измерения отбрасываются и значения

числения  $\sum_{i=1}^n S_{воспр_i}^2$  рассчитываются без значения  $S_{max}^2$ .

### Пример

Пусть на восьми станках изготавливаются одностипные детали. Требуется установить, одинакова ли точность станков.

Для каждого станка проводили по три параллельных измерения размеров детали. Результаты наблюдений представлены в табл. 2.

$X_1 - X_8$  – факторы (станки),  $Y_1 - Y_2$  – выходная величина (результаты измерений).

Таблица 2

| Номер уровня<br>(номер станка) | Уровень фактора | Параллельные значения,<br>мм |       |       |
|--------------------------------|-----------------|------------------------------|-------|-------|
|                                |                 | $Y_1$                        | $Y_2$ | $Y_3$ |
| 1                              | $X_1$           | 68,15                        | 66,50 | 65,90 |
| 2                              | $X_2$           | 68,90                        | 66,90 | 66,50 |
| 3                              | $X_3$           | 61,15                        | 61,40 | 58,30 |
| 4                              | $X_4$           | 62,12                        | 61,50 | 58,60 |
| 5                              | $X_5$           | 72,00                        | 68,85 | 70,35 |
| 6                              | $X_6$           | 71,10                        | 68,40 | 72,30 |
| 7                              | $X_7$           | 64,90                        | 65,00 | 61,80 |
| 8                              | $X_8$           | 61,40                        | 58,80 | 61,90 |

1. Вычисляем среднее арифметическое для каждого станка по результатам параллельных измерений:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} Y_{ij}.$$

Для первого станка  $\bar{y}_1 = \frac{1}{3}(68,15 + 66,50 + 65,90) = 66,85$ , аналогично вычисляем для других станков. Результаты расчетов записываем в табл. 3

2. Вычисляем дисперсию воспроизводимости параллельных измерений:

$$S_{воспр_i}^2 = \frac{1}{m_i - 1} \sum_{j=1}^{m_i} (Y_{ij} - \bar{y}_i)^2.$$

Для первого станка

$$S_{воспр_1}^2 = \frac{1}{3-1} [(68,15 - 66,85)^2 + (66,50 - 66,85)^2 + (65,90 - 66,85)^2] = 1,35.$$

Результаты расчетов заносим в табл. 3

Таблица 3

| Номер уровня<br>(номер станка) | Уровень<br>фактора | Параллельные значения,<br>мм |                |                | $\bar{y}_i$ | $S_{воспр_i}^2$ |
|--------------------------------|--------------------|------------------------------|----------------|----------------|-------------|-----------------|
|                                |                    | Y <sub>1</sub>               | Y <sub>2</sub> | Y <sub>3</sub> |             |                 |
| 1                              | X <sub>1</sub>     | 68,15                        | 66,50          | 65,90          | 66,85       | 1,35            |
| 2                              | X <sub>2</sub>     | 68,90                        | 66,90          | 66,50          | 67,43       | 2,65            |
| 3                              | X <sub>3</sub>     | 61,15                        | 61,40          | 58,30          | 60,28       | 2,96            |
| 4                              | X <sub>4</sub>     | 62,12                        | 61,50          | 58,60          | 60,74       | 3,53            |
| 5                              | X <sub>5</sub>     | 72,00                        | 68,85          | 70,35          | 70,40       | 2,48            |
| 6                              | X <sub>6</sub>     | 71,10                        | 68,40          | 72,30          | 70,60       | 3,99            |
| 7                              | X <sub>7</sub>     | 64,90                        | 65,00          | 61,80          | 63,90       | 3,31            |
| 8                              | X <sub>8</sub>     | 61,40                        | 58,80          | 61,90          | 60,70       | 2,77            |

3. Вычисляем сумму дисперсии воспроизводимости для всех станков:

$$\sum_{i=1}^8 S_{воспр_i}^2 = 1,35 + 2,65 + 2,96 + 3,53 + 2,48 + 3,99 + 3,31 + 2,77 = 22,05.$$

4. Из табл. 3 видно, что для шестого станка измерения являются «дикими», так как значение его дисперсии гораздо больше остальных. Поэтому осуществляем проверку дисперсий с использованием критерия Кохрена.

$$G_{расч} = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^n S_{воспр_i}^2} < G_{табл},$$

$$G_{расч} = \frac{3,99}{22,05} = 0,18.$$

Табличное значение критерия Кохрена  $G_{табл}$ , найденное по таблице прил. 1 (при  $N = 8$  (количество станков)  $f = m - 1 = 3 - 1 = 2$ ), равно 0,5157. Так как выполняется условие  $G_{расч} < G_{табл}$  ( $0,18 < 0,5157$ ), то дисперсии однородны и шестое измерение отбрасывать нельзя.

Сравнение полученных значений дисперсий дает наглядное представление об одинаковой точности и однородности работы станков.

### **Методика выполнения работы**

1. Определить цель исследования (точность станков, качество СОЖ и т.д.).  
Определить результаты исследования (отклик, выходную величину) и фактор.
2. Изменяя фактор, произвести сбор информации о результатах исследования.
3. Составить таблицу наблюдений (табл. 1).
4. Выполнить необходимые для однофакторного дисперсионного анализа расчеты.
5. Дать заключение по результатам исследования.

### **Задание**

Получить у преподавателя задание на проведение работы или выбрать его самостоятельно, согласовав задание с преподавателем. Работу выполнить по предложенной методике.

### **Контрольные вопросы**

1. Для какой цели применяют дисперсионный анализ?
2. Назовите этапы проведения дисперсионного анализа.
3. Какие рекомендации Вы можете дать по выполненному Вами исследованию?

## **Практическая работа №2 КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ**

**Цель работы:** приобрести знания, умения и навыки проведения корреляционного анализа.

### **Общие положения**

Одной из важных статистических задач является установление взаимосвязи между изучаемыми факторами (например, нужно выяснить, изменяются ли два признака самостоятельно, независимо друг от друга, или же изменение одного из них вызывает изменение другого).

Корреляционные связи – когда каждому значению переменной соответствует не одно, а несколько значений другой переменной.

Примерами корреляционной связи являются зависимости: между пределами прочности и текучести стали определенной марки, между погрешностью размера и погрешностью формы поверхности детали, обработанной определенным методом, между температурой испытания и ударной вязкостью стали, между усилием прижима ролика и шероховатостью накатанной детали. В первых двух примерах имеет место корреляционная связь между двумя отклика-

ми, а в третьем и четвертом – между фактором, который является случайной величиной в связи с погрешностью измерения, и откликом.

По характеру корреляционные связи могут быть прямолинейными и криволинейными.

Прямолинейной называется такая корреляционная связь, когда равным изменениям одной переменной соответствуют равные изменения другой переменной (рис. 2 а, б). В случае криволинейной корреляции равным изменениям одной переменной могут соответствовать любые изменения другой переменной (рис. 2 в).

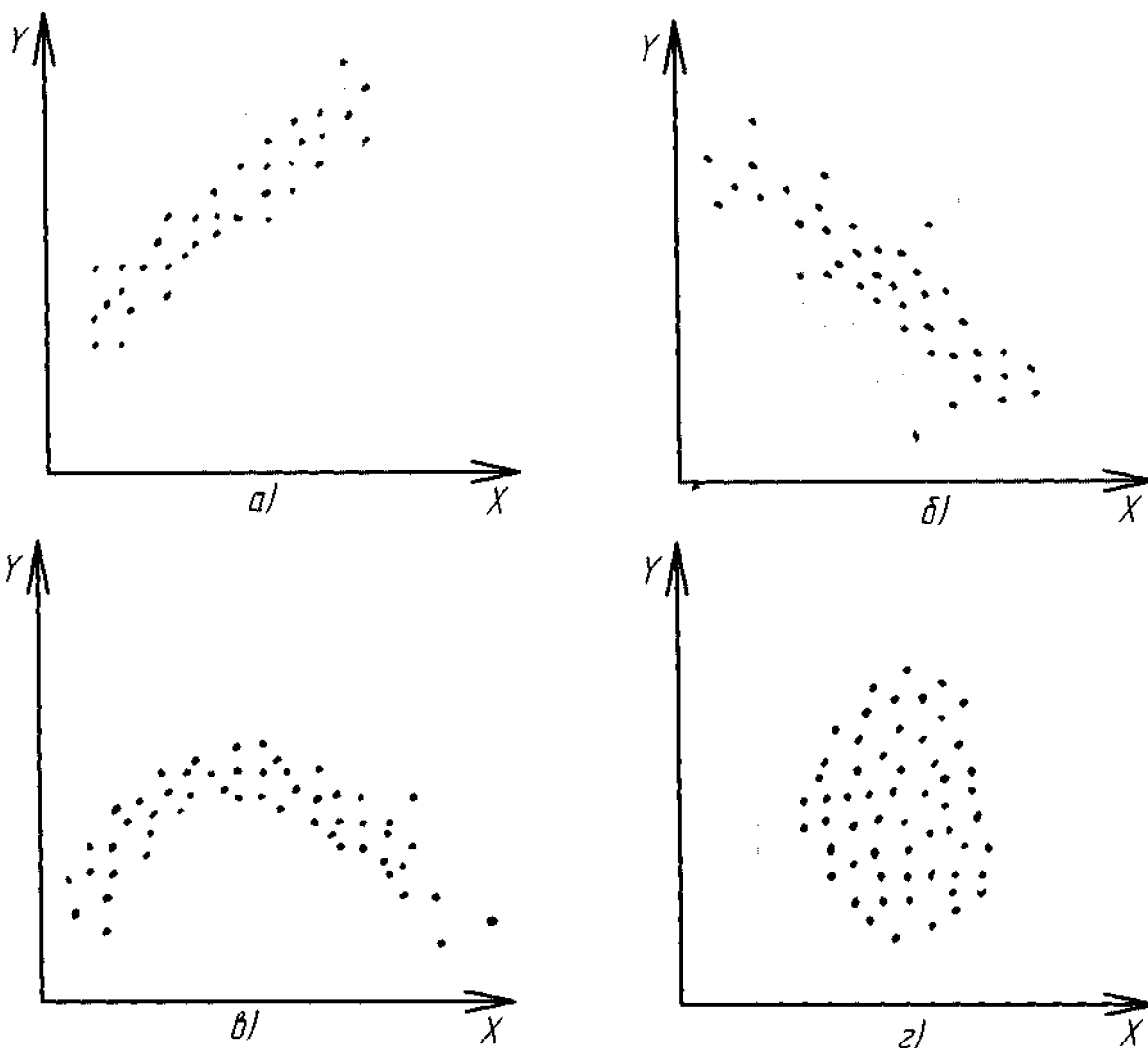


Рис. 2. Корреляционные зависимости (диаграммы рассеивания)

Под положительной корреляцией подразумевается такая корреляция, когда с увеличением одной переменной увеличивается другая переменная (рис. 2 а). При отрицательной корреляции с увеличением одной переменной другая, наоборот, убывает (рис. 2 б).

На рис. 2 в представлен случай, когда между переменными отсутствует связь (нет корреляции).

Для установления корреляционной связи между переменными X и Y результаты наблюдений представляют в виде корреляционной матрицы (табл. 4). Для этого значения X и Y разбиваются на ряд интервалов и определяются средние значения интервалов. В ячейки, образованные пересечением строк и столбцов, заносятся частоты попадания пар значений (X, Y) в соответствующие интервалы по X и Y. Например, частота 3, занесенная в ячейку пересечения первой строки и первого столбца, означает, что в интервал изменения X от 10 до 12 и в интервал изменения Y от 20 до 30 попало 3 наблюдавшихся значения.

В последней строке и в последнем столбце записаны суммарные частоты по соответствующим строке и столбцу.

Уже из обзора табл. 4 видно, что с возрастанием X возрастает и Y. Однако эту связь целесообразно выразить количественно и оценить статистически.

Эта оценка производится следующим образом. Вычисляем частные средние значения для  $\bar{X}$  по строкам. Для первой строки значению  $\bar{Y} = 25$  соответствуют значения  $\bar{X} = 11$  и 13 с частотами 3 и 2.

Частная средняя этих значений

$$\bar{X}_1 = \frac{11 \cdot 3 + 13 \cdot 2}{3 + 2} = 11,8.$$

Частная средняя для второй строки

$$\bar{X}_2 = \frac{13 \cdot 6 + 15 \cdot 4 + 25 \cdot 1}{6 + 4 + 1} = 14,8.$$

Результаты вычисления частных средних для всех строк запишем в табл. 5.

Таблица 4

## Корреляционная матрица

| X \ Y          | 10-12<br>11 | 12-14<br>13 | 14-16<br>15 | 16-18<br>17 | 18-20<br>19 | 20-22<br>21 | 22-24<br>23 | 24-26<br>25 | 26-28<br>27 | 28-30<br>29 | 30-32<br>31 | 32-34<br>33 | $m_x$ |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| 20-30<br>25    | 3           | 2           |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             | 5     |
| 30-40<br>35    |             | 6           | 4           |             |             |             |             | 1           |             |             |             |             | 11    |
| 40-50<br>45    |             | 1           | 13          | 5           |             |             |             |             |             |             |             |             | 19    |
| 50-60<br>55    |             | 1           | 2           | 4           | 8           |             |             |             |             |             |             |             | 15    |
| 60-70<br>65    |             |             | 1           |             | 4           | 4           | 2           |             |             |             |             |             | 11    |
| 70-80<br>75    |             |             |             |             | 2           | 6           | 6           | 1           |             |             |             |             | 15    |
| 80-90<br>85    |             |             |             |             |             |             | 1           | 5           |             |             |             |             | 6     |
| 90-100<br>95   |             |             |             |             |             |             |             | 1           | 4           | 1           |             |             | 6     |
| 100-110<br>105 |             |             |             |             |             |             |             |             | 2           | 4           | 1           | 1           | 8     |
| 110-120<br>115 |             |             |             |             |             |             |             |             |             | 1           |             | 1           | 2     |
| 120-130<br>125 |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             | 1           | 1     |
| $m_y$          | 3           | 10          | 20          | 9           | 14          | 10          | 9           | 8           | 6           | 6           | 1           | 3           |       |

## Значения частных средних

|             |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{Y}_i$ | 25   | 35   | 45    | 55    | 65    | 75    | 85    | 95    | 105   | 115   | 125   |
| $\bar{X}_i$ | 11,8 | 14,8 | 15,42 | 17,53 | 20,09 | 21,80 | 24,66 | 27,00 | 29,25 | 31,00 | 33,00 |

Основной задачей корреляционного анализа является определение тесноты линейной корреляционной связи, которую характеризует коэффициент корреляции  $r$ , вычисляемый по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{mS_X S_Y}, \quad S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2}{m-1}}, \quad S_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2}{m-1}},$$

где  $S_X, S_Y$  – среднеквадратические отклонения;  $m = 11$ .

Если принять (табл. 4), что  $\bar{Y}_i = Y_i, \bar{X}_i = X_i$ , то

$$\bar{Y} = \frac{1}{11}(25+35+45+55+65+75+85+95+105+115+125) = 75;$$

$$\bar{X} = \frac{1}{11}(11,8+14,8+15,42+17,53+20,09+21,80+24,66+27,00+29,25+31,00+33,00) = 22,39.$$

Выполнив расчеты, получим  $r_{xy} = 0,80$ .

Значение коэффициента корреляции колеблется от -1 до +1. Знак плюс указывает на положительную связь, а знак минус – на отрицательную. Коэффициент корреляции, равный единице, указывает на функциональную зависимость между переменными. Коэффициент корреляции, равный нулю, указывает либо на отсутствие связи, либо на то, что она имеет криволинейный характер.

Принято считать, что если  $r_{xy} \geq 0,71$ , то связь между переменными тесная. Если  $r_{xy} < 0,50$ , то связь между изучаемыми переменными слабая.

Расчет коэффициента корреляции осуществлялся для выборочной совокупности. Поэтому возникает вопрос о достоверности коэффициента корреляции. Проверка коэффициента корреляции производится при помощи критерия Стьюдента. Расчетное (опытное) значение критерия



$$t_{расч} = r \sqrt{\frac{(m-2)}{(1-r^2)}}.$$

Критическое (табличное  $t_{табл.}$ ) значение критерия определяем из таблицы прил. 2 по принятому уровню значимости и числу степеней свободы  $f = m - 2$ .

Если  $|t_{расч}| < t_{табл.}$ , то принимается гипотеза, что связь между переменными отсутствует, величины являются независимыми. В противном случае связь между двумя свойствами является доказанной.

В рассматриваемом примере  $t_{расч} = 0,8 \sqrt{\frac{(11-2)}{(1-0,8^2)}} = 2,96$ . При числе степеней свободы  $f = m - 2 = 11 - 2 = 9$  и уровне значимости 0,05  $t_{табл.} = 2,26$  условие  $|t_{расч}| < t_{табл.}$  не выполняется. Поэтому имеются основания считать, что взаимосвязь между изучаемыми факторами существует.

### Методика выполнения работы

1. Произвести сбор информации исследуемых параметров (X, Y).
2. Составить таблицу исходных данных параметров X и Y.
3. На миллиметровой бумаге построить координатную сетку и нанести точками исходные данные таблицы.
4. Выполнить необходимые расчеты.
5. Сделать заключения по результатам исследования.

### Задание

Получить у преподавателя задание на проведение работы или выбрать его самостоятельно, согласовав задание с преподавателем. Работу выполнить по предложенной методике.

### Контрольные вопросы

1. Для какой цели применяют диаграмму рассеивания?
2. Какие виды корреляционных зависимостей Вы знаете?
3. Как строится корреляционная матрица?
4. Какой величиной определяется теснота корреляционных связей?
5. Этапы выполнения корреляционного анализа.

### Практическая работа №3

## ПРОВЕРКА СЛУЧАЙНОСТИ И НЕЗАВИСИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ В ВЫБОРКЕ

**Цель работы:** приобрести навыки в оценке независимости результатов измерений в выборке.

### Общие положения

До статистической обработки результатов измерения отклика исследуемой величины необходимо убедиться в том, что они являются стохастически независимыми. Альтернативной гипотезой может быть предположение о наличии монотонного или циклического смещения (дрейфа) значения отклика, вызванного неконтролируемым фактором. Подобный случай может иметь место при анализе размеров деталей, обрабатываемых на настроенном станке, когда вследствие изнашивания инструмента или нагрева станка центр группирования размеров постепенно смещается при неизменной стандартной погрешности. Проверка случайности и независимости результатов измерений в выборке осуществляется с использованием критериев последовательных разностей  $\tau$ .

Наблюдаемое (расчетное) значение критерия

$$\tau_{расч} = c^2/S^2,$$

где  $c^2 = \frac{1}{2(m-1)} \sum_{i=1}^{m-1} (Y_{i+1} - Y_i)^2$ ;  $m$  – объем выборки;  $i$  – порядковый номер измерения отклика в выборке;  $S^2$  – оценка дисперсии.

Табличное (критическое)  $\tau_{табл}$  значение определяется из таблицы прил. 6 в зависимости от принятой доверительной вероятности  $P$  и объема выборки  $m$ . Если  $\tau_{расч} < \tau_{табл}$ , то гипотеза о независимости и случайности измерений в выборке отвергается.

### Пример

По результатам измерения деталей, обработанных на токарно-револьверном автомате (рис. 3), необходимо проверить наличие или отсутствие дрейфа размеров. Объем выборки  $m = 40$ .

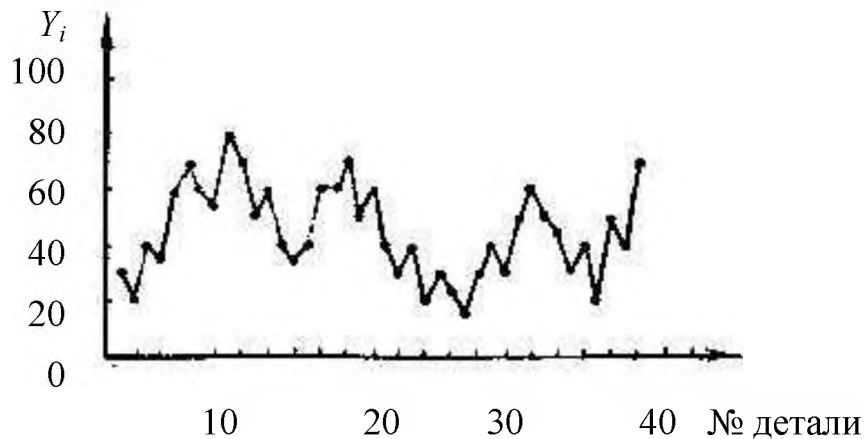


Рис. 3. Временной ряд (изменение размеров деталей, обрабатываемых на автомате)

$$\bar{y} = \frac{1}{40} \sum_{i=1}^{40} Y_i = 45 \text{ мкм},$$

$$S^2 = \frac{1}{40-1} \sum_{i=1}^{40} (Y_i - \bar{y})^2 = 267,95 \text{ мкм}^2,$$

$$c^2 = \frac{1}{2(40-1)} \sum_{i=1}^{39} (Y_{i+1} - Y_i)^2 = 114,74 \text{ мкм}^2,$$

$$\tau_{расч} = 114,74 / 267,95 = 0,428.$$

По таблице прил. 6 для  $m = 40$  и  $P = 0,95$  получаем  $\tau_{табл} = 0,742$ . Так как  $\tau_{расч} < \tau_{табл}$  ( $0,428 < 0,742$ ), гипотезу об отсутствии дрейфа следует отклонить. Следовательно, размер обрабатываемых деталей зависит от неучтенного фактора, вызвавшего циклическое смещение центра группирования размеров.

### Методика выполнения работы

1. Выбрать объект исследования (в качестве объекта исследования рекомендуется выбрать объект, с которым предполагается работать в последующих практических работах).
2. Произвести необходимые измерения.
3. Выполнить необходимые расчеты.
4. Сделать заключения по результатам исследования.

## **Задание**

Получить у преподавателя задание на проведение работы или выбрать его самостоятельно, согласовав задание с преподавателем. Работу выполнить по предложенной методике.

### **Контрольные вопросы**

1. Зачем необходимо выполнять проверку случайности и независимости результатов измерений в выборке?
2. Этапы выполнения проверки случайности и независимости результатов измерений в выборке.

## **Практическая работа №4 ВЫБОР ФАКТОРОВ, УРОВНЕЙ ИХ ВАРЬИРОВАНИЯ И НУЛЕВОЙ ТОЧКИ**

**Цель работы:** приобрести знания, умения и навыки по выбору факторов, их уровней варьирования, кодированию факторов.

### **Общие положения**

Под фактором понимают величину, воздействующую на исследуемый процесс и принимающую в некоторый момент определенное значение. Фактор считается заданным, если указаны его название и область определения. В выбранной области определения он может иметь несколько значений, которые соответствуют числу его различных состояний. Выбранные для эксперимента количественные и качественные состояния фактора носят название уровней фактора.

В качестве факторов рекомендуется выбирать такие независимые переменные, которые соответствуют одному из разумных в рассматриваемом случае воздействий на объект исследований, могут быть измерены имеющимися средствами с достаточно высокой гарантированной точностью, являются управляемыми и однозначными, совместимы один с другим, не связаны между собой линейными корреляционными связями. Желательно, чтобы факторы оценивались количественно, хотя возможно применение факторов, характеризующихся только качественно.

В планировании эксперимента значения факторов, соответствующие определенным уровням их варьирования, выражаются в кодированных величинах.

Кодирование – это перевод натуральных значений уровней факторов в кодовые безразмерные величины с целью построения стандартной матрицы эксперимента.

Для факторов с непрерывной областью определения кодирование осуществляют по формуле

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i},$$

где  $X_i$  – кодовое значение  $i$ -го фактора;  $x_i$  – натуральное текущее значение  $i$ -го фактора;  $x_{i0}$  – начальный (нулевой) уровень фактора;  $\Delta x_i$  – интервал варьирования  $i$ -го фактора, который рассчитывается как

$$\Delta x_i = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2}.$$

После кодирования уровни факторов принимают значения -1, +1: +1 – верхний уровень; -1 – нижний уровень, 0 – нулевой уровень.

Интервалом варьирования факторов называется некоторое число (свое для каждого фактора), прибавление которого к основному уровню дает верхний, а вычитание – нижний уровни факторов. Другими словами, интервал варьирования – это расстояние на координатной оси между основным (нулевым) и верхним уровнем; между основным и нижним уровнем.

Если, например, два фактора совместны, то границы образуют на плоскости некоторый прямоугольник, называемый факторным пространством (рис. 4).

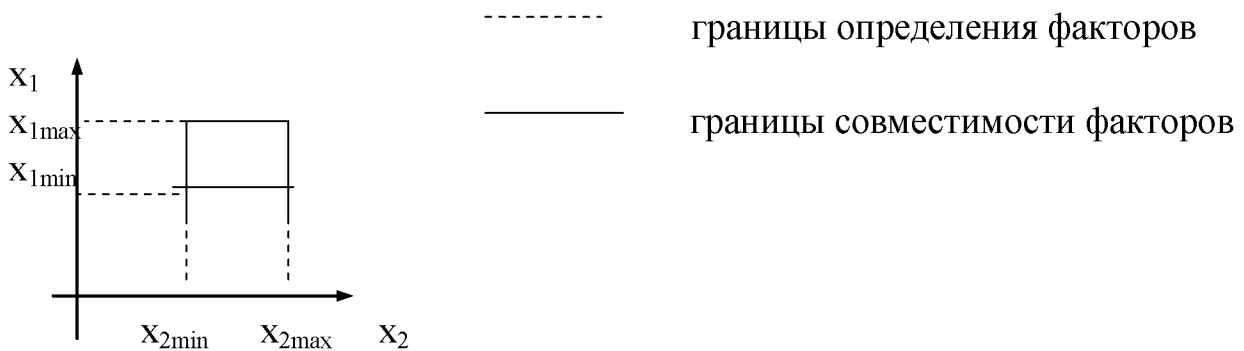


Рис. 4. Область определения факторов

После выбора факторов устанавливают нулевую точку и выбирают интервалы варьирования для установления верхних и нижних уровней факторов, которые в кодированном обозначении соответствуют +1 и -1.

Интервал варьирования фактора выбирают с учетом того, что значения факторов, соответствующие уровням +1 и -1, должны быть достаточно отличимы от значения, соответствующего нулевому уровню. Поэтому во всех случаях

величина интервала варьирования должна быть больше удвоенной квадратичной ошибки фиксирования данного фактора.

Здесь необходимо учитывать, что чрезмерное увеличение интервалов варьирования может привести к снижению эффективности поиска оптимума, а малый интервал варьирования уменьшает область эксперимента, что замедляет поиск оптимума.

Выбор факторов завершается составлением списка всех факторов, которые заслуживают внимания. При этом указываются наименования и обозначения факторов, их интервалы и уровни варьирования, координаты нулевой точки. Перечисленные данные фиксируются в таблицах (например, табл. 6).

Таблица 6

| Уровни факторов       | Наименование и обозначение факторов |  | Кодированные значения факторов |       |
|-----------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------|-------|
|                       | $\tau$ – время, мин ( $X_1$ )       | $p$ – давление, кг/см <sup>2</sup> ( $X_2$ ) | $X_1$                          | $X_2$ |
| Интервал варьирования | 10                                  | 2,5  | 1                              | 1     |
| Верхний уровень       | 30                                  | 7,5  | +1                             | +1    |
| Нижний уровень        | 10                                  | 2,5  | -1                             | -1    |
| Основной уровень      | 20                                  | 5  | 0                              | 0     |

В натуральных значениях (рис. 5):

$$X_{1\max} = 30 \text{ мин}, \quad X_{1\min} = 10 \text{ мин}, \quad \Delta X_1 = (30 - 10)/2 = 10;$$

$$X_{2\max} = 7,5 \text{ кг/см}^2, \quad X_{2\min} = 2,5 \text{ кг/см}^2, \quad \Delta X_2 = (7,5 - 2,5)/2 = 2,5.$$

Для кодированных значений (рис. 6):

$$X_{1\text{верх}} = +1, \quad X_{1\text{нижн}} = -1, \quad \Delta X_1 = 1;$$

$$X_{2\text{верх}} = +1, \quad X_{2\text{нижн}} = -1, \quad \Delta X_2 = 1.$$

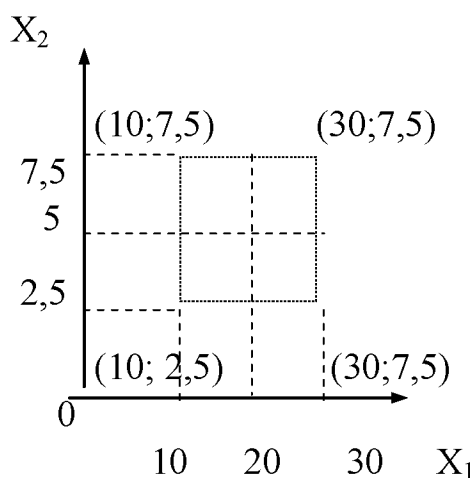


Рис. 5. Уровни факторов до кодирования

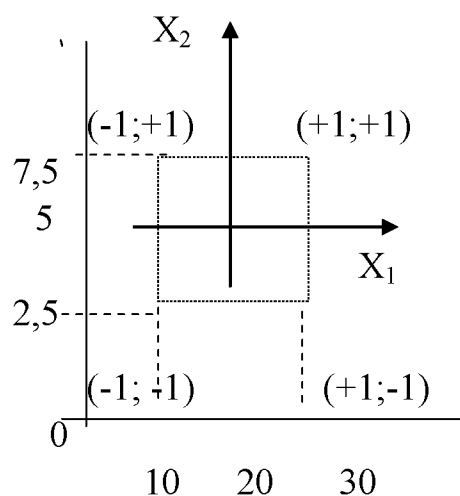


Рис. 6. Уровни факторов после кодирования

### **Методика выполнения работы**

1. Выбрать объект исследования (машина, прибор, процесс и т.д.).
2. Определить факторы и дать их описание, характер влияния на исследуемый объект, методы и способы регулирования, измерения и т.д.
3. Выбрать нулевой уровень и интервалы варьирования.
4. Заполнить таблицу факторов.

### **Задание**

Получить у преподавателя задание на проведение работы или выбрать его самостоятельно, согласовав задание с преподавателем. Работу выполнить по предложенной методике.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение факторов.
2. Для чего выполняют кодирование факторов?
3. Какие уровни факторов Вы знаете?
4. Что понимают под интервалом варьирования факторов?

## **Практическая работа №5 АПРИОРНОЕ РАНЖИРОВАНИЕ ФАКТОРОВ (ПСИХОЛОГИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)**

**Цель работы:** приобрести знания, умения и навыки априорного ранжирования факторов (психологический эксперимент).

### **Общие положения**

Рассматриваются методы, которые применяют при обработке литературных данных на первой стадии экспериментальной работы в тех случаях, когда из большего числа факторов нужно выделить наиболее важные для дальнейшего изучения и отсеять остальные.

На стадии предварительного изучения объекта исследования при формализации априорных сведений иногда полезно проведение психологического эксперимента, заключающегося в объективной обработке данных, полученных в результате опроса специалистов или из исследований, опубликованных в литературе. Такой эксперимент позволяет более правильно спроектировать объект исследования, принять или отвергнуть некоторые предварительные гипотезы, дать сравнительную оценку влияния различных факторов на параметры оптимизации и тем самым правильно отобрать факторы для последующего активного эксперимента, обоснованно исключив некоторые из них из дальнейшего рассмотрения.

При решении подобных задач можно использовать метод априорного ранжирования факторов.

Особенность метода априорного ранжирования факторов заключается в том, что факторы, которые согласно априорной информации могут иметь существенное влияние, ранжируются в порядке убывания вносимого ими вклада. Вклад каждого фактора оценивается по величине ранга – места, которое отведено исследователем (специалистом при опросе, автором статьи и т.п.) данному фактору при ранжировании всех факторов с учетом их предполагаемого (количественно неизвестного) влияния на параметры оптимизации. При сборе мнений путем опроса специалистов каждому из них предлагается заполнить анкету, в которой перечислены факторы, их размерность и предполагаемые интервалы варьирования. Заполняя анкету, специалист определяет место факторов в ранжированном ряду. Одновременно он может включить дополнительные факторы или высказать мнение об изменении интервалов варьирования.

По результатам опроса вычисляется коэффициент конкордации  $W$ , определяющий степень согласованности мнения специалистов:

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k) - m \sum_{j=1}^m T_j},$$

где  $m$  – число опрошенных специалистов;  $k$  – число факторов;

$$T_j = \sum (t_j^3 - t_j),$$

где  $t_j$  – число одинаковых рангов в  $j$ - ранжировании;  
 $S$  – сумма квадратов отклонений:

$$S = \sum_{i=1}^k \left( \sum_{j=1}^m a_{ij} - L \right)^2,$$

где  $a_{ij}$  – ранг (порядковый номер при опросе)  $i$ -го фактора у  $j$ -го специалиста;  $L$  – среднее значение сумм рангов по каждому фактору:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}}{k}.$$



Значения коэффициента конкордации изменяются в интервале от 0 до 1, и чем больше его значение, тем больше согласованность мнений специалистов.

После вычисления коэффициента конкордации определяют его значимость по  $\chi^2$ -критерию, так как величина  $m(k-1)W$  имеет  $\chi^2$ -распределение с числом степеней свободы  $f = k-1$ . Расчетное значение  $\chi^2_{расч}$  определяется по формуле

$$\chi^2_{расч} = \frac{12S}{mk(k+1) - \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^m T_i^2}$$

Гипотеза о наличии согласования между специалистами принимается, если  $\chi^2_{расч} \geq \chi^2_{табл}$  ( $\chi^2_{табл}$  выбирается из таблицы прил. 3 и зависит от числа степеней свободы и вероятности).

Оценив согласованность мнений всех специалистов, строят среднюю диаграмму рангов, откладывая по одной оси факторы, а по другой – соответствующие суммы рангов. Чем меньше сумма рангов данного фактора, тем выше его место в диаграмме. С помощью последней оценивается значимость факторов.

### Пример

Проведен опрос четырех специалистов ( $m = 4$ ) с помощью анкеты, содержащей 12 факторов ( $k = 12$ ), которые нужно проранжировать с учетом степени их влияния на результаты опроса. Результаты опроса представлены в табл. 7.

Таблица 7

Таблица результатов опроса специалистов

| Специалисты $m$ | Факторы ( $k$ ) |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                 | X <sub>1</sub>  | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> | X <sub>5</sub> | X <sub>6</sub> | X <sub>7</sub> | X <sub>8</sub> | X <sub>9</sub> | X <sub>10</sub> | X <sub>11</sub> | X <sub>12</sub> |
| 1               | 8               | 10,5           | 10,5           | 10,5           | 1              | 2,5            | 2,5            | 10,5           | 5              | 4               | 7               | 6               |
| 2               | 8               | 9              | 10             | 11             | 1              | 6,5            | 6,5            | 12             | 2              | 3               | 4               | 5               |
| 3               | 6               | 7,5            | 7,5            | 11             | 2              | 4,5            | 4,5            | 12             | 1              | 3               | 9,5             | 9,5             |
| 4               | 7               | 4              | 8              | 10,5           | 2              | 10,5           | 10,5           | 10,5           | 1              | 3               | 5,5             | 5,5             |

Обработка результатов опроса осуществляется в следующей последовательности (результаты заносят в табл. 8).

1. Сначала определяем сумму рангов для каждого фактора:

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} = 8 + 8 + 6 + 7 = 29 \text{ (например } X_1 \text{. Для других факторов проводят}$$

аналогичные расчеты).

2. Вычисляем среднее значение суммы рангов:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij}}{k} = \frac{29+31+36+43+6+24+24+45+9+13+26+26}{12} = 26.$$

3. Находим разность между суммой рангов каждого из факторов и средним значением суммы рангов:

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} - L = 29 - 26 = 3 \text{ (для } X_1); \quad \sum_{j=1}^m a_{ij} - L = 31 - 26 = 5 \text{ (для } X_2).$$

4. Вычисляем квадрат разности:  $3^2=9$  (для  $X_1$ );  $5^2=25$  (для  $X_2$ ).

5. Вычисляем сумму квадратов отклонений:

$$S = \sum_{i=1}^m (\sum_{j=1}^m a_{ij} - L)^2 = 9 + 25 + 100 + 289 + 400 + 4 + 4 + 361 + 289 + 169 + 0 + 0 = 1650.$$

6.  $T_j = \sum (t_j^3 - t_j)$ ,  $t_j$  – число одинаковых рангов в  $j$ -ом ранжировании.

Первый специалист оценку 10,5 поставил 4 раза, а оценку 2,5 – 2 раза, тогда  $T_j = (4^3 - 4) + (2^3 - 2) = 60 + 6 = 66$ .

Для второго специалиста: 6,5 – 2 раза, тогда  $T_j = (2^3 - 2) = 6$ .

Для третьего специалиста: 7,5 – 2 раза, 4,5 – 2 раза, 9,5 – 2 раза, тогда  $T_j = (2^3 - 2) + (2^3 - 2) + (2^3 - 2) = 18$ .

Для четвертого специалиста: 10,5 – 4 раза, 5,5 – 2 раза, тогда  $T_j = (4^3 - 4) + (2^3 - 2) = 60 + 6 = 66$ .

7. Находим сумму  $\sum T_j = 66 + 6 + 18 + 66 = 156$ .

8. Вычисляем коэффициент конкордации:

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k) - m \sum_{j=1}^m T_j} = \frac{12 \cdot 1650}{4^2(12^3 - 12) - 4 \cdot 156} = 0,738.$$

9. Проверяем значимость коэффициента по  $\chi^2$ -критерию:

$$\chi^2_{расч} = \frac{12S}{mk(k+1) - \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^m T_i} = \frac{12 \cdot 1650}{4 \cdot 12 \cdot (12+1) - \frac{1}{(12+1)} \cdot 156} = 32,3;$$

$$f = k - 1 = 12 - 1 = 11.$$

По таблице прил. 3 при вероятности 0,95 (95%) и числе степеней свободы 11 находим, что  $\chi^2_{табл} = 4,6$ ;  $4,6 < 32,3$  (т.е.  $\chi^2_{табл} < \chi^2_{расч}$ ). Поэтому можно с 95-процентной достоверностью утверждать о согласованности мнений специалистов. Это позволяет построить гистограмму результатов (рис. 7).

Таблица 8

Таблица результатов опроса специалистов

| Специалисты $m$               | Факторы ( $k$ ) |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          | $T_j$      |
|-------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|------------|
|                               | $X_1$           | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ | $X_9$ | $X_{10}$ | $X_{11}$ | $X_{12}$ |            |
| 1                             | 8               | 10,5  | 10,5  | 10,5  | 1     | 2,5   | 2,5   | 10,5  | 5     | 4        | 7        | 6        | 66         |
| 2                             | 8               | 9     | 10    | 11    | 1     | 6,5   | 6,5   | 12    | 2     | 3        | 4        | 5        | 6          |
| 3                             | 6               | 7,5   | 7,5   | 11    | 2     | 4,5   | 4,5   | 12    | 1     | 3        | 9,5      | 9,5      | 18         |
| 4                             | 7               | 4     | 8     | 10,5  | 2     | 10,5  | 10,5  | 10,5  | 1     | 3        | 5,5      | 5,5      | 66         |
| $\sum_{j=1}^m a_{ij}$         | 29              | 31    | 36    | 43    | 6     | 24    | 24    | 45    | 9     | 13       | 26       | 26       | 156        |
| $\sum_{j=1}^m a_{ij} - L$     | 3               | 5     | 10    | 17    | -20   | -2    | -2    | 19    | -17   | -13      | 0        | 0        |            |
| $(\sum_{j=1}^m a_{ij} - L)^2$ | 9               | 25    | 100   | 289   | 400   | 4     | 4     | 361   | 289   | 169      | 0        | 0        | $S = 1650$ |

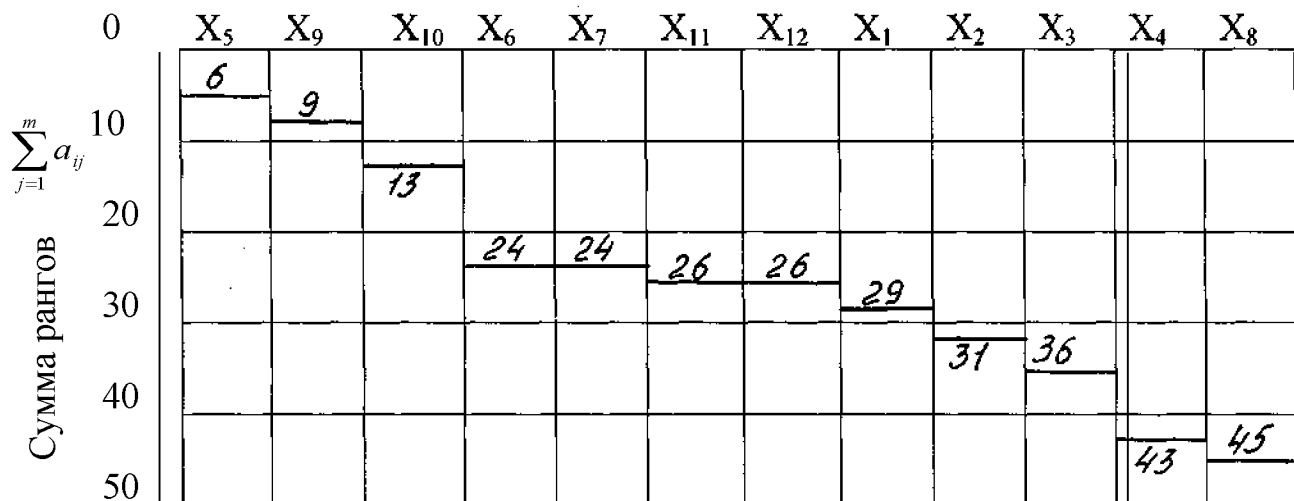


Рис. 7. Гистограмма результатов

### Методика выполнения работы

1. Составить анкету для опроса специалистов, где исследуемые факторы взяты из практической работы № 4.

2. Заполнить анкету, привлекая в качестве специалистов студентов Вашей учебной группы.

3. Выполнить статистическую обработку результатов опроса.

### **Задание**

Получить у преподавателя задание на проведение работы или выбрать его самостоятельно, согласовав задание с преподавателем. Работу выполнить по предложенной методике.

### **Контрольные вопросы**

1. Для каких целей выполняют априорное ранжирование факторов?
2. В чем заключается процедура эксперимента при априорном ранжировании факторов?
3. Как строят диаграмму рангов?
4. Какие факторы исключают из дальнейшего рассмотрения после выполнения априорного ранжирования факторов?

## **Практическая работа №6 ПОЛНЫЙ ФАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ**

**Цель работы:** приобрести знания, умения и навыки по планированию полного факторного эксперимента.

### **Общие положения**

Использование кодированной системы координат (практическая работа №4) позволяет очень компактно и наглядно записать порядок проведения эксперимента в виде матрицы (плана) экспериментов. Различают планы первого и второго порядка. В планах первого порядка влияющие факторы варьируются на двух уровнях, а в планах второго порядка – на трех уровнях.

Полный факторный эксперимент (ПФЭ) – это эксперимент, в котором реализуются все возможные, неповторяющиеся комбинации уровней факторов.

Если число факторов равно  $k$ , а число уровней каждого из них равно  $S$ , то число комбинаций (опытов)  $N$  при ПФЭ будет  $N = S^k$ .

Тогда  $2^k$  – это эксперименты с двумя уровнями варьирования факторов,  $3^k$  – эксперименты с тремя уровнями варьирования факторов. Эксперименты при  $S > 3$  встречаются очень редко в связи с резким ростом числа независимых опытов.

Полный факторный эксперимент  $N = 2^k$  позволяет описать процесс математической моделью первого порядка вида

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j .$$

План (матрица) первого порядка двухфакторного эксперимента строится следующим образом (табл. 9). Во втором столбце записывается фактор  $X_0$ , служащий для определения коэффициента регрессии. В третьем столбце записывается фактор  $X_1$ , поочередно варьируемый на верхнем (+1 или +) и нижнем (-1 или -) уровнях. Фактор  $X_2$ , записываемый в четвертом столбце, варьируется в первых двух опытах на верхнем и в последних двух – на нижнем уровнях. В этом плане имеется одно взаимодействие факторов  $X_1 X_2$ , записываемое в пятом столбце (знаки в столбце взаимодействия получены перемножением по строкам знаков факторов  $X_1$  и  $X_2$ ). На рис. 8 представлена геометрическая интерпретация ПФЭ.

Таблица 9

Матрица планирования ПФЭ  $2^2$

| № опыта | $X_0$ | $X_1$ | $X_2$ | $X_1 X_2$ | $y$   |
|---------|-------|-------|-------|-----------|-------|
| 1       | +     | +     | +     | +         | $y_1$ |
| 2       | +     | -     | +     | -         | $y_2$ |
| 3       | +     | +     | -     | -         | $y_3$ |
| 4       | +     | -     | -     | +         | $y_4$ |

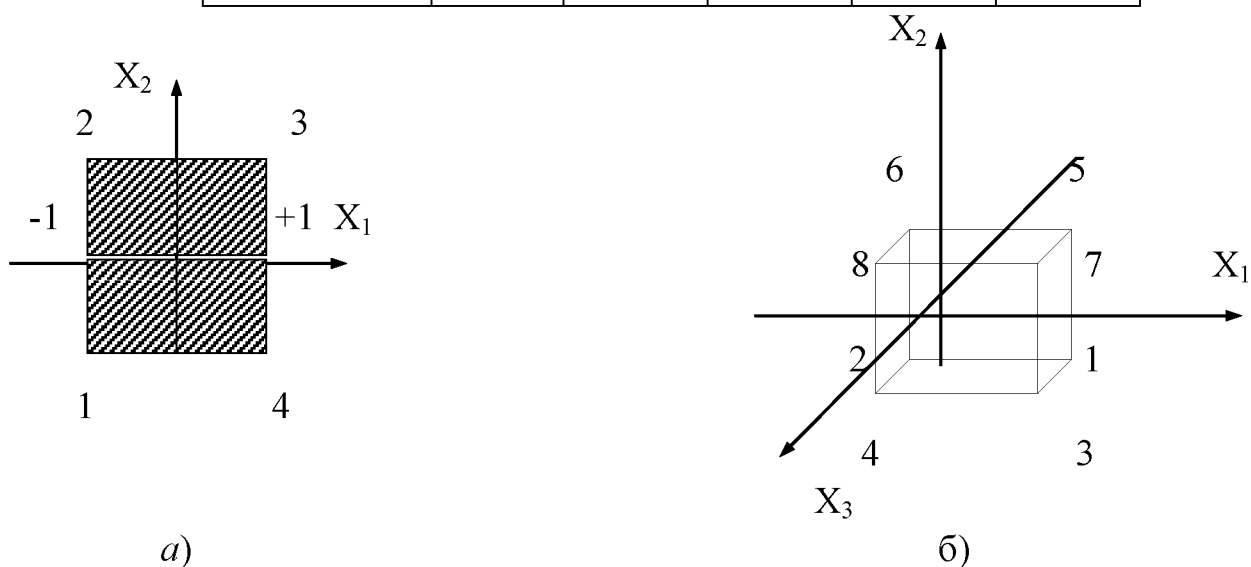


Рис. 8. Геометрическая интерпретация ПФЭ: а) – в двумерном пространстве ( $N = 2^2$ ); б) – в трехмерном пространстве ( $N = 2^3$ )

Построенный таким образом план обладает рядом свойств.

1. Содержит все комбинации (+) и (-), поэтому такие планы называются планами полного факторного эксперимента.

2. Благодаря переносу осей координат в центр эксперимента планы обладают свойствами ортогональности. Свойство ортогональности дает возможность избавиться от недостатков классического регрессионного анализа и позволяет значительно снизить вычислительные трудности, возникающие при расчете коэффициентов регрессии.

3. Переход к безразмерным переменным делает все факторы равноправными внутри изучаемой области. Все коэффициенты регрессии оказываются независимыми, и каждый коэффициент характеризует роль соответствующей переменной в процессе, что дает возможность на основании величин и знаков коэффициентов регрессии судить об их роли в процессе.

4. Благодаря ортогональности планов эксперимента коэффициенты регрессии вычисляются путем простого сложения значений отклика в соответствии со знаками столбца данного фактора:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji} Y_i}{N},$$

где  $X_i$  – знак фактора в соответствующем ему столбце.

Этапы планирования и реализации ПФЭ:

- 1) выбор параметров оптимизации, факторов и уровней их варьирования ( $2^k$ );
- 2) кодирование факторов;
- 3) составление план-матрицы (матрица планирования) эксперимента;
- 4) рандомизация опытов;
- 5) реализация плана эксперимента;
- 6) проверка однородности дисперсий параллельных опытов, их воспроизводимости;
- 7) расчет коэффициентов уравнения регрессии, их ошибок и значимости;
- 8) проверка адекватности модели.

Пункты 1–4 были рассмотрены выше. Рандомизация позволяет исключить влияние систематических ошибок, вызванных внешними условиями. Пусть проводится эксперимент  $2^2$ . Матрица планирования представлена в табл. 9. Для реализации плана эксперимента необходимо выполнить четыре опыта. Например, первый и второй опыты ставим сегодня, а третий, четвертый – завтра, то различие в условиях эксперимента может вызвать систематическую ошибку, которая отразится на величине  $b_2$ , так как в первом и втором опытах фактор  $X_2$  находится на верхнем уровне, а в третьем и четвертом опытах – на нижнем уровне.

Если в рассматриваемом примере  $2^2$  предполагается каждое значение параметра оптимизации ( $y$ ) определить по двум параллельным опытам, то всего полу-

чается 8 опытов ( $4 \cdot 2 = 8$ ), тогда для определения порядка проведения опытов воспользуемся таблицей случайных чисел (прил. 4). Например, начиная с шестого столбца записываем числа с 1 до 8, отбрасывая больше 8, то можно получить следующую последовательность: 1; 3; 7, 4; 5; 6; 8; 2. Тогда можно составить таблицу проведения опытов (табл. 10).

Таблица 10

|                                     |   |   |   |   |
|-------------------------------------|---|---|---|---|
| Номер опыта по матрице планирования | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Случайный порядок реализаций опытов | 1 | 3 | 7 | 4 |
|                                     | 5 | 6 | 8 | 2 |

### Пример

Исследовался процесс изменения температуры в узле трения. Ранее было выяснено, что на температуру в узлах трения без смазки влияют следующие факторы: удельная нагрузка  $p$ , скорость скольжения  $v$  и первоначальная шероховатость трущейся шейки стального валика  $R_a$ .

Для оценки влияния указанных факторов и математического описания процесса трения использована модель первого порядка вида

$$\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3. \quad (1)$$

Рассматриваемый пример – полный факторный эксперимент типа  $2^3$ .  $X_1, X_2, X_3$  – факторы, а  $y$  – исследуемая величина (температура в узле трения).

Значения выбранных уровней варьируемых факторов даны в табл. 11.

Таблица 11

| Уровень варьируемых факторов | Обозначение кодовое | $p, \text{ кг/см}^2$ | $v, \text{ м/с}$ | $R_a, \text{ мкм}$ |
|------------------------------|---------------------|----------------------|------------------|--------------------|
|                              |                     | $X_1$                | $X_2$            | $X_3$              |
| Основной уровень             | 0                   | 6,84                 | 0,59             | 1,57               |
| Интервал варьирования        | $\Delta x_i$        | 4,00                 | 0,31             | 0,92               |
| Верхний уровень              | +1                  | 10,84                | 0,90             | 0,65               |
| Нижний уровень               | -1                  | 2,84                 | 0,28             | 2,50               |

Каждый опыт проводили трижды. Порядок постановки опытов определяли с помощью таблиц случайных чисел.

Матрица планирования эксперимента и результаты испытаний представлены в табл. 12.

Таблица 12

| № опыта | $X_0$ | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_1X_2$ | $X_1X_3$ | $X_2X_3$ | $X_1X_2X_3$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $\bar{y}_i$ | $S_{воспр_i}^2$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|-------------|-------|-------|-------|-------------|-----------------|
| 1       | +     | -     | -     | -     | +        | +        | +        | -           | 57    | 60    | 55    | 57          | 6,5             |
| 2       | +     | +     | -     | -     | -        | -        | +        | +           | 57    | 55    | 52    | 54          | 7,0             |
| 3       | +     | -     | +     | -     | -        | +        | -        | +           | 80    | 85    | 90    | 85          | 25,0            |
| 4       | +     | +     | +     | -     | +        | -        | -        | -           | 120   | 125   | 130   | 125         | 25,0            |
| 5       | +     | -     | -     | +     | +        | -        | -        | +           | 50    | 55    | 45    | 50          | 25,0            |
| 6       | +     | +     | -     | +     | -        | +        | -        | -           | 54    | 55    | 60    | 56          | 10,5            |
| 7       | +     | -     | +     | +     | -        | -        | +        | -           | 55    | 50    | 60    | 55          | 25,0            |
| 8       | +     | +     | +     | +     | +        | +        | +        | +           | 98    | 105   | 115   | 106         | 73,0            |

1. Среднее значение параметра оптимизации по параллельным опытам определяем, например, для первого опыта:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} y_{ij} = \frac{57+60+55}{3} = 57.$$

Для всех остальных аналогично. Результаты заносим в табл. 12

2. Определяем дисперсию параллельных опытов, например, для первого опыта:

$$S_{воспр_i}^2 = \frac{1}{m_i - 1} \sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 = \frac{1}{3-1} [(57-57)^2 + (60-57)^2 + (55-57)^2] = 6,5.$$

Для всех остальных аналогично. Результаты заносим в табл. 12.

3. Вычисляем сумму дисперсии воспроизводимости для всех опытов:

$$\sum_{i=1}^8 S_{воспр_i}^2 = 6,5 + 7,0 + 25,0 + 25,0 + 25,0 + 10,5 + 25,0 + 73,0 = 197,0.$$

4. Из табл. 12 видно, что для восьмого опыта величина дисперсии гораздо больше остальных. Поэтому осуществляем проверку дисперсий с использованием критерия Кохрена  $G_{расч} < G_{табл}$ :

$$G_{расч} = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^n S_{воспр_i}^2} = \frac{73,0}{197} = 0,37,$$

Табличное значение критерия Кохрена  $G_{табл}$ , найденное по таблице прил. 1 (при  $N = 8$  (количество опытов)  $f = m - 1 = 3 - 1 = 2$ ), равно 0,5157. Так как вы-



полняется условие  $G_{расч} < G_{табл}$  ( $0,37 < 0,5157$ ), то принимаем гипотезу об однородности дисперсий.

5. Вычисляем дисперсию воспроизводимости для всего эксперимента:

$$S_{восп}^2 = S_{(y)}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{восп_i}^2 = \frac{197,0}{8} = 24,62.$$

6. Вычисляем ошибку всего эксперимента:

$$S(y) = \sqrt{S_{(y)}^2} = \sqrt{24,62} \approx 4,96 \approx 5,0.$$

7. Рассчитываем коэффициенты уравнения (1):

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_1^N X_{in} \bar{y}_i, \quad b_0 = \frac{1}{N} \sum_1^N \bar{y}_i, \quad b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_1^N X_{in} X_{jn} \bar{y}_i,$$

$$b_1 = \frac{-57 + 54 - 85 + 125 - 50 + 56 - 55 + 106}{8} = \frac{94}{8} = 11,75.$$

Аналогично рассчитываются коэффициенты  $b_2$  и  $b_3$ :

$$b_0 = \frac{57 + 54 + 85 + 125 + 50 + 56 + 55 + 106}{8} = \frac{588}{8} = 73,5,$$

$$b_{12} = \frac{57 - 54 - 85 + 125 + 50 - 56 - 55 + 106}{8} = \frac{88}{8} = 11.$$

и т. д.

После расчета всех коэффициентов уравнение (1) принимает вид

$$\hat{y} = 73,5 + 11,75 X_1 + 19,1 X_2 - 6,8 X_3 + 11 X_1 X_2 + 2,5 X_1 X_3 - 5,4 X_2 X_3 + 0,3 X_1 X_2 X_3. \quad (2)$$

8. Проверяем статистическую значимость коэффициентов.

Проверку проводим с помощью  $t$ -критерия. Для полного факторного эксперимента ошибки всех коэффициентов равны между собой и определяются следующим образом:

$$S(b_i) = \frac{S(y)}{\sqrt{Nm}} = \frac{5,0}{\sqrt{8 \cdot 3}} = 1,02.$$

Далее определяем доверительный интервал длиной  $2\Delta b_i$ :

$$\Delta b_i = t_{табл} S(b_i) = 2,12 \cdot 1,02 = 2,16.$$

Табличное значение  $t_{табл}$  выбираем по таблице прил. 2 для числа степеней свободы  $f = N(m - 1) = 8(3 - 1) = 16$  и по принятому уровню значимости 0,05, т.е.  $t_{табл} = 2,12$ . Таким образом все коэффициенты уравнения (2), кроме  $b_{123}$ , оказа-

лись статистически значимыми. После исключения статистически незначимого коэффициента  $b_{123}$  уравнение регрессии принимает вид

$$\hat{y} = 73,5 + 11,75 X_1 + 19,1 X_2 - 6,8 X_3 + 11 X_1 X_2 + 2,5 X_1 X_3 - 5,4 X_2 X_3. \quad (3)$$

9. Проверяем уравнение на адекватность.

Данная проверка проводится с целью доказательства пригодности полученного уравнения регрессии для описания экспериментальных данных с заданной точностью. Для этого оценивают отклонения вычисленных по уравнениям регрессии (3) значений функции оптимизации  $\hat{y}$  от экспериментально установленных  $\bar{y}$  (табл.12).

Для первого опыта уравнение регрессии (3) будет иметь вид (т.е. вместо значений  $X_1, X_2, X_3$  и т.д. выбираем + или – согласно 1 строке (1 опыту))

$$\hat{y}_1 = 73,5 + 11,75 \cdot (-1) + 19,1 \cdot (-1) - 6,8 \cdot (-1) + 11 \cdot (+1) + 2,5 \cdot (+1) - 5,4 \cdot (+1) = 57,6.$$

Аналогично рассчитываются значения для других опытов. Результаты расчетов представлены в табл. 13. Кроме этого в табл. 13 представлены результаты расчетов значений функции оптимизации  $\hat{y}$  без учета коэффициента  $b_{13}$ .

Таблица 13

| № опыта | С учетом коэффициента |             | Без учета коэффициента |
|---------|-----------------------|-------------|------------------------|
|         | $\bar{y}_i$           | $\hat{y}_i$ | $\hat{y}_i$            |
| 1       | 57                    | 57,6        | 55,1                   |
| 2       | 54                    | 54,4        | 56,9                   |
| 3       | 85                    | 84,8        | 82,3                   |
| 4       | 125                   | 125,0       | 127,7                  |
| 5       | 50                    | 49,8        | 52,3                   |
| 6       | 56                    | 56,6        | 54,3                   |
| 7       | 55                    | 55,4        | 57,9                   |
| 8       | 106                   | 105,8       | 103,3                  |

Для оценки отклонений используют критерий Фишера  $F$ -критерий. Находят значения  $F$ - критерия Фишера (дисперсное отношение):

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S_{восп}^2} = \frac{S_{ад}^2}{S^2(y)},$$

где  $S_{ad}^2 = \frac{m_i}{N-l} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y})^2$  – дисперсия адекватности;  $m_i$  – число параллельных опытов в  $i$ -й сточке матрицы планирования;  $\bar{y}_i$  – среднее арифметическое функции отклика (из  $m$  параллельных опытов);  $\hat{y}$  – значение функции отклика, предсказанное по уравнению (3) в  $i$ -м опыте;  $l$  – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии;  $N$  – число независимых опытов.

С учетом коэффициента  $b_{13}$  величина дисперсии адекватности

$$S_{ad}^2 = \frac{m_i}{N-l} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y})^2 = \frac{3}{8-7} \sum_{i=1}^8 (57-57,6)^2 + (54-54,4)^2 + (85-84,8)^2 + (125-125)^2 + (50-49,8)^2 + (56-56,6)^2 + (55-55,4)^2 + (106-105,8) = 1,77.$$

Без учета коэффициента  $b_{13}$  величина дисперсии адекватности:

$$S_{ad}^2 = \frac{m_i}{N-l} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y})^2 = \frac{3}{8-6} \sum_{i=1}^8 (57-55,1)^2 + (54-56,9)^2 + (85-82,3)^2 + (125-127,7)^2 + (50-52,3)^2 + (56-54,3)^2 + (55-57,9)^2 + (106-103,3) = 75,135.$$

Гипотезу об адекватности уравнения (3) проверяли с учетом значимости коэффициента  $b_{13}$  и соответственно без его учета:

$$F_{1,расч} = \frac{S_{1ад}^2}{S^2(y)} = \frac{1,77}{24,62} = 0,072;$$

$$F_{2,расч} = \frac{S_{2ад}^2}{S^2(y)} = \frac{75,135}{24,5} = 3,06.$$

Для того чтобы воспользоваться таблицей  $F$ -критерия, необходимо определить число степеней свободы  $f_{ад}$  и  $f_{восп}$ :  $f_{ад} = N-l$ . С учетом значимости коэффициента  $b_{13}$   $f_{ад} = 8-7=1$ , без учета значимости коэффициента  $b_{13}$   $f_{ад} = 8-6=2$ ;  $f_{восп} = N(m-1) = 8(3-1) = 16$ .

Исходя из найденных значений  $f_{ад}$ ,  $f_{восп}$  находим по таблице прил. 5  $F_{1,табл} = 4,49$ , а  $F_{2,табл} = 3,63$ . Если  $F_{расч} < F_{табл}$ , то уравнение считают адекватным.

В рассматриваемом примера с учетом значимости коэффициента  $b_{13}$   $0,072 < 4,49$ , а без учета значимости коэффициента  $b_{13}$   $3,06 < 3,63$ . Поэтому для упрощения расчетов выбираем уравнение регрессии без учета значимости коэффициента  $b_{13}$  ( $b_{13} = 0$ ):

$$\hat{y} = 73,5 + 11,75 X_1 + 19,1 X_2 - 6,8X_3 + 11 X_1X_2 - 5,4 X_2X_3 . \quad (4)$$

Для приведения уравнения (4) к виду с натуральными значениями факторов используют формулу кодирования, подставляя в уравнение (4) вместо кодовых натуральных значения факторов.

На основании полученных результатов и анализа уравнения (4) можно сделать следующие выводы.

1. С увеличением удельной нагрузки  $p$  и скорости скольжения  $v$  температура в зоне трения возрастает (так как коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$  при  $X_1$  и  $X_2$  положительные), причем наибольшее влияние оказывает скорость скольжения при выбранных условиях варьирования ( $b_2 > b_1$ ).

2. С уменьшением шероховатости поверхности  $R_a$  снижается температура в зоне трения, так как  $b_3$  отрицателен, но влияние этого фактора менее значительно, чем удельного давления и скорости скольжения ( $b_3 < b_1 < b_2$ ).

3. Наряду с линейными эффектами значимыми оказались также и эффекты взаимодействия  $X_1X_2$  и  $X_2X_3$ , причем эти взаимодействия противоположны по своему эффекту (они имеют противоположные знаки). Для снижения температуры в зоне трения необходимо стремиться при увеличенных нагрузках снижать скорость скольжения. Снижение шероховатости поверхности позволяет несколько повысить скорость скольжения.

Использование полного факторного эксперимента позволило не только оценить влияние факторов и их взаимодействий, но и наметить гипотезы по выяснению механизма процесса.

### **Методика выполнения работы**

1. Пользуясь данными практических работ № 4 и 5 или выбрав объект исследования, выполнить необходимые расчеты по предложенной в работе последовательности.

2. По результатам расчетов сделать выводы.

### **Задание**

Использовать данные практических работ № 4 и 5 или получить у преподавателя задание на проведение работы. Работу выполнить по предложенной методике.

### **Контрольные вопросы**

1. Дать определение полному факторному эксперименту.
2. Назовите этапы планирования и реализации полного факторного эксперимента.
3. Для какой цели выполняют рандомизацию опытов?

4. Для чего осуществляют проверку статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии.
5. Как влияет знак коэффициента регрессии на значение функции отклика?
6. Как осуществляют проверку уравнения на адекватность?

## Практическая работа №7 ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ОТЫСКАНИИ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

**Цель работы:** приобрести знания, умения и навыки планирования эксперимента при отыскании экстремальной области.

### Общие положения

Одной из основных задач планирования эксперимента является задача поиска экстремума функции отклика. Эта задача возникает при оптимизации производственных и научно-технических процессов, осуществляемых для улучшения свойств изделий, изучения предельных возможностей приборов и устройств и т.д.

Поиск экстремума функции отклика происходит путем исследования поверхности отклика. Анализ результатов первой серии опытов позволяет выбрать направление движения в область оптимума по кратчайшему пути, проводя сравнительно небольшое число опытов. Для поиска оптимальных значений параметра оптимизации применяют следующие методы: градиентный, безградиентный и случайного поиска.

Наиболее широкое распространение получил градиентный метод. Преимущества указанного метода перед другими состоит в том, что он позволяет определить оптимум при минимальном числе опытов.

После планирования и реализации многофакторного эксперимента, проверки однородности дисперсий параллельных опытов, их воспроизводимости, расчета коэффициентов уравнения регрессии, их ошибок и значимости проверяют адекватность модели. Если модель адекватна, то переходят к следующему этапу – поиску оптимальной области методом градиента. Особенность метода градиента заключается в том, что движение к оптимальной области осуществляется в направлении градиента функции отклика, причем направление движения уточняется после каждого шага по результатам специально поставленных пробных опытов.

Градиентом функции называется вектор  $gradY = \sum_{i=1}^k \frac{\partial Y}{\partial x_i} \vec{e}_i$ ,

где  $\frac{\partial Y}{\partial x_i}$  – частные производные функции отклика по  $i$ -му фактору;  
 $\vec{e}_i$  – единичный вектор, направленный по оси  $i$ -го фактора.

Так как для линейной модели  $\frac{\partial Y}{\partial x_i} = b_i$ , то в задачах поиска градиентными

методами  $gradY = \sum_{i=1}^k b_i \vec{e}_i$ .

Изменяя факторы пропорционально значениям  $b_i$  (с учетом знака), можно двигаться в направлении градиента. Этот путь к экстремуму является самым коротким и быстрым.

Для движения по градиенту необходимо рассчитать координаты проведения будущих опытов в факторном пространстве, задавшись параметром  $\lambda$ , который определяет величину шагов по осям факторов. При выборе  $\lambda$  следует учитывать возможность фиксирования факторов в некоторых случаях на дискретных, вполне определенных уровнях. Например, при наличии в станке зубчатой коробки скоростей и подач последние можно фиксировать только на определенных уровнях и изменять по закону геометрической прогрессии.

В общем случае шаг изменения координат (факторов) для движения по градиенту

$$\Delta h_{ij} = j \lambda b_i \Delta x_i, \quad (5)$$

где  $\Delta h_{ij}$  – изменение уровня  $i$ -го фактора (отсчет ведется от нулевого уровня) на  $j$ -м шаге;  $j$  – номер шага крутого восхождения (спуска);  $\lambda$  – параметр (0, 2, ..., 4);  $b_i$  – параметр модели для  $i$ -го фактора;  $\Delta x_i$  – интервал варьирования  $i$ -го фактора.

Если фактор изменяется дискретно, то его изменение при движении по градиенту происходит путем последовательного перехода от одного уровня к другому или при очень коротких шагах можно переходить по четным уровням, пропуская нечетные. Тогда, обозначив номер этого фактора  $i = 1$ , из (5) получим

$$\lambda_j = h_{1j} / (j b_1 \Delta x_1).$$

Если крутое восхождение оказалось эффективным и в результате его достигнут оптимум, то экспериментатор может закончить исследование или продолжить его с целью подробного изучения области оптимума. Если же в результате эффективного крутого восхождения оптимум не достигнут, то исследование следует продолжать с целью дальнейшего поиска оптимума. Для оценки ситуации необходимо принять за центр линейного плана нового эксперимента точку факторного пространства, соответствующую наилучшему ре-

зультату крутого восхождения (движения по градиенту). Когда после реализации нового линейного плана выяснилось, что линейная модель неадекватна, факт достижения оптимума является достаточно вероятным. Когда же новая модель (линейная) адекватна, следует повторить крутое восхождение по новому градиенту.

### Пример

Необходимо определить оптимальные условия суперфинишной обработки цилиндрической детали охватывающей головкой с брусками марки 24АМ40СМ1К. В качестве параметра оптимизации выбрана производительность процесса, характеризуемая интенсивностью съема припуска  $Q$  (мкм/мин); в качестве влияющих факторов — частота колебаний брусков  $f$  (мин<sup>-1</sup>); частота вращения детали  $n$  (об/мин); давление в гидроцилиндре, прижимающем бруски к детали,  $p$  (МПа); амплитуда осцилляции  $A$  (мм).

Исходный уровень факторов и интервалы их варьирования приведены в табл. 14.

Таблица 14

| Уровень варьируемых факторов | Обозначение кодовое | $f$ , мин <sup>-1</sup> | $n$ , об/мин | $p$ , МПа | $A$ , мм |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--------------|-----------|----------|
|                              |                     | $X_1$                   | $X_2$        | $X_3$     | $X_4$    |
| Основной уровень             | 0                   | 885                     | 25,75        | 2,25      | 3,5      |
| Интервал варьирования        | $\Delta x_i$        | 135                     | 5,75         | 0,25      | 0,5      |
| Верхний уровень              | +1                  | 1020                    | 31,5         | 2,5       | 4        |
| Нижний уровень               | -1                  | 750                     | 20           | 2,0       | 3        |

Выполнив обработку результатов по методике, предложенной в практической работе №7, были получены следующие коэффициенты регрессии:  $b_0 = 32$ ;  $b_1 = -0,5$ ;  $b_2 = 6$ ;  $b_3 = 1,75$ ;  $b_4 = 3,25$ .

Оценка статистической значимости коэффициентов показала, что коэффициент  $b_1 = -0,5$  является статистически незначимым. Поэтому считаем, что фактор  $X_1$  слабо влияет на исследуемый процесс и его можно из дальнейшего рассмотрения исключить, зафиксировав на нижнем уровне (так как  $b_1 < 0$ ).

Математическая модель процесса будет иметь вид

$$\hat{y} = 32 + 6X_2 + 1,75X_3 + 3,25X_4.$$

Для поиска области экстремума двигаемся по градиенту в трехфакторном пространстве  $X_2$ ;  $X_3$ ;  $X_4$  (т.е.  $n$ ,  $p$ ,  $A$ ).

Станок для суперфинишной обработки имеет коробку скоростей, обеспечивающую следующий ряд частот вращения: 20, 25; 31; 5; 40; 50; 63; 80; 100; 125;

140; 160 об/мин. Так как из всех коэффициентов  $b_2$  является наибольшим, следовательно фактор  $X_2$  ( $n$ ) в большей степени оказывает влияние на исследуемый процесс. Поэтому принято решение двигаться по этому фактору от основного уровня  $n_0 = 25$  об/мин по следующим дискретным значениям:  $n_1 = 63$ ;  $n_2 = 100$ ;  $n_3 = 125$ ;  $n_4 = 160$ . Тогда величины шагов будут следующие:

$$\lambda_j = h_{1j}/(j b_1 \Delta x_1), \quad (\Delta x_2 = 5,75, \text{ см. табл. 14}):$$

$$\lambda_1 = \frac{63 - 25}{1 \cdot 6 \cdot 5,75} = 1,1; \quad \lambda_2 = \frac{100 - 25}{2 \cdot 6 \cdot 5,75} = 1;$$

$$\lambda_3 = \frac{125 - 25}{3 \cdot 6 \cdot 5,75} = 0,9; \quad \lambda_4 = \frac{160 - 25}{4 \cdot 6 \cdot 5,75} = 0,98.$$

Координаты фактора давления ( $p$ ) вычисляем по формуле

$$X_{ij} = X_{i0} + j \lambda_j b_i \Delta x_i, \quad (X_{30} = 2,25; \Delta x_3 = 0,25, \text{ см. табл. 14}; b_i = b_3 = 1,75)$$

$$p_1 = 2,25 + 1 \cdot 1,1 \cdot 1,75 \cdot 0,25 = 2,7 \text{ МПа};$$

$$p_2 = 2,25 + 2 \cdot 1 \cdot 1,75 \cdot 0,25 = 3,1 \text{ МПа};$$

$$p_3 = 2,25 + 3 \cdot 0,9 \cdot 1,75 \cdot 0,25 = 3,4 \text{ МПа};$$

$$p_4 = 2,25 + 4 \cdot 0,98 \cdot 1,75 \cdot 0,25 = 3,9 \text{ МПа}.$$

Так как максимально допустимое давление в гидроцилиндре составляет 3,5 МПа, то после третьего шага движение по этому фактору пришлось прекратить, зафиксировав его на самом высоком уровне.

Аналогично вычисляем координаты фактора – амплитуды осцилляции  $A$ .

$$X_{ij} = X_{i0} + j \lambda_j b_i \Delta x_i, \quad (X_{40} = 3,5; \Delta x_4 = 0,5, \text{ см. табл. 14}; b_i = b_4 = 3,25)$$

$$A_1 = 3,5 + 1 \cdot 1,1 \cdot 3,25 \cdot 0,5 = 5,3 \text{ мм}.$$

Так как амплитуда осцилляции на данном станке не может превышать 4 мм, то на этом уровне она поддерживалась на всех шагах движения по градиенту. Координаты точек факторного пространства, в которых проводился последовательный поиск, и результаты эксперимента представлены в табл. 15.



Таблица 15

| Номер точки $j$ | $f$ , мин <sup>-1</sup> | $n$ , об/мин | $p$ , МПа | $A$ , мм | Функция отклика $Q$ , мкм/мин |
|-----------------|-------------------------|--------------|-----------|----------|-------------------------------|
| 1               | 750                     | 63           | 2,7       | 4        | 76                            |
| 2               | 750                     | 100          | 3,1       | 4        | 125                           |
| 3               | 750                     | 125          | 3,5       | 4        | 120                           |
| 4               | 750                     | 160          | 3,5       | 4        | 57                            |

Из таблицы видно, что первый и второй шаги восхождения были эффективными. Третий шаг был уже неэффективным, так как производительность станка уменьшилась. Для дополнительной проверки гипотезы о неэффективности дальнейшего продвижения в том же направлении был сделан четвертый шаг, который показал резкое уменьшение производительности. Таким образом, дальнейшее продвижение по градиенту после второго и третьего шагов не имеет смысла. Поэтому следует проанализировать создавшуюся ситуацию и принять решение о дальнейших опытах.

### Методика выполнения работы

1. Пользуясь данными практической работы № 6 или выбрав объект исследования, выполнить необходимые расчеты по предложенной в работе последовательности.
2. По результатам расчетов сделать выводы.

### Задание

Использовать данные практической работы № 6 или получить у преподавателя задание на проведение работы. Работу выполнить по предложенной методике.

### Контрольные вопросы

1. Какие задачи помогает решать планирование эксперимента при отыскании экстремальной области?
2. В чем заключается особенность градиентного метода при движении к оптимальной области?
3. Назовите последовательность этапов выполнения планирования эксперимента при отыскании экстремальной области.

## Приложение 1

Значения критерия Кохрена (G-критерий) при уровне значимости 0,05 (доверительной вероятности 0,95)

| $N \backslash f$ | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2                | 0,9985 | 0,9750 | 0,9392 | 0,9057 | 0,8772 | 0,8534 | 0,8332 | 0,8159 | 0,8010 | 0,7880 |
| 3                | 0,9669 | 0,8709 | 0,7977 | 0,7457 | 0,7771 | 0,6771 | 0,6530 | 0,6333 | 0,6167 | 0,6025 |
| 4                | 0,9065 | 0,7679 | 0,7841 | 0,6287 | 0,5895 | 0,5598 | 0,5365 | 0,5175 | 0,5017 | 0,4884 |
| 5                | 0,8412 | 0,6838 | 0,5981 | 0,5441 | 0,5665 | 0,4783 | 0,4564 | 0,4387 | 0,4241 | 0,4118 |
| 6                | 0,7808 | 0,6161 | 0,5321 | 0,4803 | 0,4447 | 0,4184 | 0,3980 | 0,3817 | 0,3682 | 0,3568 |
| 7                | 0,7271 | 0,5612 | 0,4800 | 0,4307 | 0,3974 | 0,3726 | 0,3535 | 0,3384 | 0,3259 | 0,3154 |
| 8                | 0,6798 | 0,5157 | 0,4377 | 0,3910 | 0,3595 | 0,3362 | 0,3185 | 0,3040 | 0,2926 | 0,2829 |
| 9                | 0,6385 | 0,4775 | 0,4027 | 0,3584 | 0,3286 | 0,3067 | 0,2901 | 0,2768 | 0,2659 | 0,2568 |
| 10               | 0,6020 | 0,4450 | 0,3733 | 0,3311 | 0,3029 | 0,2823 | 0,2666 | 0,2541 | 0,2439 | 0,2353 |
| 12               | 0,5410 | 0,3924 | 0,3264 | 0,2880 | 0,2624 | 0,2439 | 0,2299 | 0,2187 | 0,2098 | 0,2020 |

Значение критерия Стьюдента (t-критерия)

| Число степеней свободы $f$ | Уровни значимости |       |       |       |       |
|----------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
|                            | 0,10              | 0,05  | 0,02  | 0,01  | 0,001 |
| 1                          | 6,31              | 12,71 | 31,82 | 63,66 | 63,62 |
| 2                          | 2,92              | 4,30  | 6,97  | 9,93  | 31,60 |
| 3                          | 2,35              | 3,18  | 4,54  | 5,84  | 12,94 |
| 4                          | 2,13              | 2,78  | 3,75  | 4,60  | 8,61  |
| 5                          | 2,02              | 2,57  | 3,37  | 4,08  | 6,85  |
| 6                          | 1,94              | 2,45  | 3,14  | 3,71  | 5,96  |
| 7                          | 1,90              | 2,37  | 3,00  | 3,50  | 5,41  |
| 8                          | 1,86              | 2,31  | 2,90  | 3,36  | 5,04  |
| 9                          | 1,83              | 2,26  | 2,82  | 3,25  | 4,78  |
| 10                         | 1,81              | 2,23  | 2,76  | 3,17  | 4,59  |
| 11                         | 1,80              | 2,20  | 2,72  | 3,11  | 4,44  |
| 12                         | 1,78              | 2,18  | 2,68  | 3,06  | 4,32  |
| 13                         | 1,77              | 2,16  | 2,65  | 3,01  | 4,22  |
| 14                         | 1,76              | 2,15  | 2,62  | 2,98  | 4,14  |
| 15                         | 1,75              | 2,13  | 2,60  | 2,95  | 4,07  |
| 16                         | 1,75              | 2,12  | 2,58  | 2,92  | 4,02  |
| 17                         | 1,74              | 2,11  | 2,57  | 2,90  | 3,97  |
| 18                         | 1,73              | 2,10  | 2,55  | 2,88  | 3,92  |
| 19                         | 1,73              | 2,09  | 2,54  | 2,36  | 3,88  |
| 20                         | 1,73              | 2,09  | 2,53  | 2,85  | 3,85  |
| 21                         | 1,72              | 2,08  | 2,52  | 2,83  | 3,82  |
| 22                         | 1,72              | 2,07  | 2,51  | 2,82  | 3,79  |
| 23                         | 1,71              | 2,07  | 2,50  | 2,81  | 3,77  |
| 24                         | 1,71              | 2,06  | 2,49  | 2,80  | 3,75  |
| 25                         | 1,71              | 2,06  | 2,48  | 2,79  | 3,73  |
| 26                         | 1,71              | 2,06  | 2,48  | 2,78  | 3,71  |
| 27                         | 1,70              | 2,05  | 2,47  | 2,77  | 3,69  |
| 28                         | 1,70              | 2,05  | 2,47  | 2,76  | 3,67  |
| 29                         | 1,70              | 2,04  | 2,46  | 2,76  | 3,66  |
| 30                         | 1,70              | 2,04  | 2,46  | 2,75  | 3,65  |
| 40                         | 1,68              | 2,02  | 2,42  | 2,70  | 3,55  |
| 60                         | 1,67              | 2,00  | 2,39  | 2,66  | 3,46  |
| 120                        | 1,66              | 1,98  | 2,36  | 2,62  | 3,37  |

Значения критерия Пирсона ( $\chi^2$ -критерия)

| Число<br>степеней<br>свободы<br><i>f</i> | Вероятность |        |        |       |       |       |       |
|--|-------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|  | 0,99        | 0,98   | 0,95   | 0,90  | 0,80  | 0,70  | 0,50  |
| 1  | 0,00016     | 0,0006 | 0,0039 | 0,016 | 0,064 | 0,148 | 0,455 |
| 2  | 0,020       | 0,040  | 0,103  | 0,211 | 0,446 | 0,713 | 1,386 |
| 3  | 0,115       | 0,185  | 0,352  | 0,584 | 1,005 | 1,424 | 2,366 |
| 4  | 0,30        | 0,43   | 0,71   | 1,06  | 1,65  | 2,19  | 3,36  |
| 5  | 0,55        | 0,75   | 1,14   | 1,61  | 2,34  | 3,00  | 4,35  |
| 6  | 1,87        | 1,13   | 1,63   | 2,20  | 3,07  | 3,83  | 5,35  |
| 7  | 1,24        | 1,56   | 2,17   | 2,83  | 3,82  | 4,67  | 6,34  |
| 8  | 1,65        | 2,03   | 2,73   | 3,49  | 4,59  | 5,53  | 7,34  |
| 9  | 2,09        | 2,53   | 3,32   | 4,17  | 5,38  | 6,39  | 8,35  |
| 10                                       | 2,56        | 3,06   | 3,94   | 4,86  | 6,18  | 7,27  | 9,34  |
| 11                                       | 3,1         | 3,6    | 4,6    | 5,6   | 7,0   | 8,1   | 10,3  |
| 12                                       | 3,6         | 4,2    | 5,2    | 6,3   | 7,8   | 9,0   | 11,3  |
| 13                                       | 4,1         | 4,8    | 5,9    | 7,0   | 8,6   | 9,9   | 12,3  |
| 14                                       | 4,7         | 5,4    | 6,6    | 7,8   | 9,5   | 10,8  | 13,3  |
| 15                                       | 5,2         | 6,0    | 7,3    | 8,5   | 10,3  | 11,7  | 14,3  |

## Приложение 4

### Фрагмент таблицы случайных чисел

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 56 | 66 | 25 | 32 | 38 | 64 | 70 | 26 | 27 | 67 | 77 | 40 | 04 | 34 | 63 | 98 | 99 | 89 | 31 | 16 | 12 | 90 | 50 | 28 | 96 |
| 88 | 40 | 52 | 02 | 29 | 82 | 69 | 34 | 50 | 21 | 74 | 00 | 91 | 27 | 52 | 98 | 72 | 03 | 45 | 65 | 30 | 89 | 71 | 45 | 91 |
| 87 | 63 | 88 | 23 | 62 | 51 | 07 | 69 | 59 | 02 | 89 | 49 | 14 | 98 | 53 | 41 | 92 | 36 | 07 | 76 | 85 | 37 | 84 | 37 | 47 |
| 32 | 25 | 21 | 15 | 08 | 82 | 34 | 57 | 57 | 35 | 22 | 03 | 33 | 48 | 84 | 37 | 37 | 29 | 38 | 37 | 89 | 76 | 25 | 09 | 69 |
| 44 | 61 | 88 | 23 | 13 | 01 | 59 | 47 | 64 | 04 | 99 | 59 | 96 | 20 | 30 | 87 | 31 | 33 | 69 | 45 | 58 | 48 | 00 | 83 | 48 |
| 94 | 44 | 08 | 67 | 79 | 41 | 61 | 41 | 15 | 60 | 11 | 88 | 83 | 24 | 82 | 24 | 07 | 78 | 61 | 89 | 42 | 58 | 88 | 22 | 16 |
| 13 | 24 | 40 | 09 | 00 | 65 | 46 | 38 | 61 | 12 | 90 | 62 | 41 | 11 | 59 | 85 | 18 | 42 | 61 | 29 | 88 | 76 | 04 | 21 | 80 |
| 78 | 27 | 84 | 05 | 99 | 85 | 75 | 67 | 80 | 05 | 57 | 05 | 71 | 70 | 31 | 31 | 99 | 99 | 06 | 96 | 53 | 99 | 25 | 13 | 63 |
| 42 | 39 | 30 | 02 | 34 | 99 | 46 | 68 | 45 | 15 | 19 | 74 | 15 | 50 | 17 | 44 | 80 | 13 | 86 | 38 | 40 | 45 | 82 | 13 | 44 |
| 04 | 52 | 43 | 96 | 38 | 13 | 83 | 80 | 72 | 34 | 20 | 84 | 56 | 19 | 49 | 59 | 14 | 85 | 42 | 99 | 71 | 16 | 34 | 33 | 79 |
| 82 | 85 | 77 | 30 | 16 | 69 | 32 | 46 | 46 | 30 | 84 | 20 | 68 | 72 | 98 | 94 | 62 | 63 | 59 | 44 | 00 | 89 | 06 | 15 | 87 |
| 38 | 48 | 84 | 88 | 24 | 58 | 46 | 48 | 60 | 06 | 90 | 08 | 83 | 83 | 98 | 40 | 90 | 88 | 25 | 26 | 85 | 74 | 55 | 80 | 85 |
| 91 | 19 | 05 | 68 | 22 | 58 | 04 | 63 | 21 | 16 | 23 | 38 | 25 | 43 | 32 | 98 | 94 | 65 | 35 | 35 | 16 | 91 | 07 | 12 | 43 |
| 54 | 81 | 87 | 21 | 31 | 40 | 46 | 17 | 62 | 63 | 99 | 71 | 14 | 12 | 64 | 51 | 68 | 50 | 60 | 78 | 22 | 69 | 51 | 98 | 37 |
| 65 | 43 | 75 | 12 | 91 | 20 | 36 | 25 | 57 | 92 | 33 | 65 | 95 | 48 | 75 | 00 | 06 | 65 | 25 | 90 | 16 | 29 | 34 | 14 | 43 |
| 49 | 98 | 71 | 31 | 80 | 59 | 57 | 32 | 43 | 07 | 85 | 06 | 64 | 75 | 27 | 29 | 17 | 06 | 11 | 30 | 78 | 70 | 97 | 87 | 21 |
| 03 | 98 | 68 | 89 | 39 | 71 | 87 | 32 | 14 | 99 | 42 | 10 | 25 | 37 | 30 | 08 | 27 | 75 | 43 | 97 | 54 | 20 | 69 | 93 | 50 |
| 56 | 04 | 21 | 34 | 92 | 89 | 81 | 52 | 15 | 12 | 84 | 11 | 12 | 66 | 87 | 48 | 21 | 06 | 86 | 08 | 35 | 39 | 52 | 28 | 09 |
| 48 | 09 | 36 | 95 | 20 | 82 | 95 | 36 | 53 | 89 | 92 | 68 | 50 | 88 | 17 | 37 | 92 | 02 | 23 | 43 | 63 | 24 | 69 | 80 | 90 |
| 23 | 97 | 10 | 96 | 57 | 74 | 07 | 95 | 26 | 44 | 93 | 08 | 43 | 30 | 41 | 86 | 45 | 74 | 33 | 78 | 84 | 33 | 38 | 76 | 73 |
| 43 | 97 | 55 | 45 | 98 | 35 | 68 | 45 | 96 | 80 | 46 | 36 | 99 | 96 | 33 | 60 | 20 | 73 | 30 | 79 | 17 | 19 | 03 | 47 | 28 |
| 40 | 05 | 08 | 50 | 79 | 89 | 58 | 19 | 86 | 48 | 27 | 98 | 99 | 24 | 08 | 94 | 19 | 15 | 81 | 29 | 82 | 14 | 35 | 88 | 03 |
| 66 | 97 | 10 | 69 | 02 | 25 | 36 | 43 | 71 | 76 | 00 | 67 | 56 | 12 | 69 | 07 | 89 | 55 | 63 | 31 | 50 | 72 | 20 | 33 | 36 |
| 15 | 62 | 38 | 72 | 92 | 03 | 76 | 09 | 30 | 75 | 77 | 80 | 04 | 24 | 54 | 67 | 60 | 10 | 79 | 26 | 21 | 60 | 03 | 48 | 14 |
| 77 | 21 | 15 | 14 | 47 | 55 | 24 | 22 | 20 | 55 | 36 | 93 | 67 | 69 | 37 | 72 | 22 | 43 | 46 | 32 | 56 | 15 | 75 | 25 | 12 |
| 18 | 87 | 05 | 09 | 96 | 46 | 14 | 72 | 41 | 46 | 12 | 67 | 46 | 72 | 08 | 59 | 06 | 17 | 49 | 12 | 73 | 28 | 23 | 59 | 48 |
| 08 | 58 | 53 | 63 | 13 | 07 | 04 | 48 | 71 | 39 | 07 | 46 | 96 | 40 | 20 | 86 | 79 | 11 | 81 | 74 | 11 | 15 | 23 | 17 | 45 |
| 16 | 07 | 79 | 57 | 61 | 42 | 19 | 68 | 15 | 12 | 60 | 21 | 59 | 12 | 07 | 04 | 99 | 88 | 22 | 39 | 75 | 16 | 69 | 13 | 84 |

## Приложение 5

Значения критерия Фишера (F-критерия) при уровне значимости 0,05 (доверительной вероятности 0,95),  
 $f_1$  – число степеней свободы большей дисперсии (*ад*),  $f_2$  – число степеней свободы меньшей дисперсии (*восп*)

| $f_2 \backslash f_1$ | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1                    | 161   | 200   | 216   | 225   | 230   | 234   | 237   | 239   | 241   | 242   | 243   |
| 2                    | 18,51 | 19,00 | 19,16 | 19,25 | 19,30 | 19,33 | 19,36 | 19,37 | 19,38 | 19,39 | 19,40 |
| 3                    | 10,13 | 9,55  | 9,28  | 9,12  | 9,01  | 8,94  | 8,88  | 8,84  | 8,81  | 8,78  | 8,76  |
| 4                    | 7,71  | 6,94  | 6,59  | 6,39  | 6,26  | 6,16  | 6,09  | 6,04  | 6,00  | 5,96  | 5,93  |
| 5                    | 6,61  | 5,79  | 5,41  | 5,19  | 5,05  | 4,95  | 4,88  | 4,82  | 4,78  | 4,74  | 4,70  |
| 6                    | 5,99  | 5,14  | 4,79  | 4,53  | 4,39  | 4,28  | 4,21  | 4,15  | 4,10  | 4,06  | 4,03  |
| 7                    | 5,90  | 4,74  | 4,35  | 4,12  | 3,97  | 3,87  | 3,79  | 3,73  | 3,68  | 3,63  | 3,60  |
| 8                    | 5,32  | 4,46  | 4,07  | 3,84  | 3,69  | 3,58  | 3,50  | 3,44  | 3,39  | 3,34  | 3,31  |
| 9                    | 5,12  | 4,26  | 3,86  | 3,63  | 3,48  | 3,37  | 3,29  | 3,23  | 3,18  | 3,13  | 3,10  |
| 10                   | 4,96  | 4,10  | 3,71  | 3,48  | 3,33  | 3,22  | 3,14  | 3,07  | 3,02  | 2,97  | 2,94  |
| 11                   | 4,84  | 3,98  | 3,59  | 3,36  | 3,20  | 3,09  | 3,01  | 2,95  | 2,90  | 2,86  | 2,82  |
| 12                   | 4,75  | 3,88  | 3,49  | 3,26  | 3,11  | 3,00  | 2,92  | 2,85  | 2,80  | 2,76  | 2,72  |
| 14                   | 4,60  | 3,74  | 3,34  | 3,11  | 2,96  | 2,85  | 2,77  | 2,70  | 2,65  | 2,60  | 2,56  |
| 16                   | 4,49  | 3,63  | 3,24  | 3,01  | 2,85  | 2,74  | 2,66  | 2,59  | 2,54  | 2,49  | 2,45  |
| 20                   | 4,35  | 3,49  | 3,10  | 2,87  | 2,71  | 2,60  | 2,52  | 2,45  | 2,40  | 2,35  | 2,31  |
| 24                   | 4,26  | 3,40  | 3,01  | 2,78  | 2,62  | 2,51  | 2,43  | 2,36  | 2,30  | 2,26  | 2,22  |
| 30                   | 4,17  | 3,32  | 2,92  | 2,69  | 2,53  | 2,42  | 2,34  | 2,27  | 2,21  | 2,16  | 2,12  |
| 40                   | 4,08  | 3,23  | 2,84  | 2,61  | 2,45  | 2,34  | 2,25  | 2,18  | 2,12  | 2,07  | 2,04  |
| 50                   | 4,03  | 3,18  | 2,79  | 2,56  | 2,40  | 2,29  | 2,20  | 2,13  | 2,07  | 2,02  | 1,98  |
| 70                   | 3,98  | 3,13  | 2,74  | 2,50  | 2,35  | 2,23  | 2,14  | 2,07  | 2,01  | 1,97  | 1,93  |
| 100                  | 3,94  | 3,09  | 2,70  | 2,46  | 2,30  | 2,19  | 2,10  | 2,03  | 1,97  | 1,92  | 1,88  |
| 200                  | 3,89  | 3,04  | 2,65  | 2,41  | 2,26  | 2,14  | 2,05  | 1,98  | 1,92  | 1,87  | 1,83  |
| 400                  | 3,86  | 3,02  | 2,62  | 2,39  | 2,23  | 2,12  | 2,03  | 1,96  | 1,90  | 1,85  | 1,81  |
| $\infty$             | 3,84  | 2,99  | 2,60  | 2,37  | 2,21  | 2,09  | 2,01  | 1,94  | 1,88  | 1,83  | 1,79  |

## Приложение 6

### Значения $t$ -критерия

| Объем вы-<br>борки (n) | Вероятность (P) |       | Объем вы-<br>борки (n) | Вероятность (P) |       |
|------------------------|-----------------|-------|------------------------|-----------------|-------|
|                        | 0,95            | 0,99  |                        | 0,95            | 0,99  |
| 4                      | 0,390           | 0,256 | 19                     | 0,642           | 0,510 |
| 5                      | 0,410           | 0,269 | 20                     | 0,650           | 0,520 |
| 6                      | 0,445           | 0,281 | 25                     | 0,676           | 0,542 |
| 7                      | 0,468           | 0,307 | 30                     | 0,704           | 0,508 |
| 8                      | 0,491           | 0,331 | 35                     | 0,725           | 0,611 |
| 9                      | 0,514           | 0,354 | 40                     | 0,742           | 0,636 |
| 10                     | 0,531           | 0,376 | 45                     | 0,757           | 0,658 |
| 11                     | 0,548           | 0,397 | 50                     | 0,769           | 0,674 |
| 12                     | 0,564           | 0,414 | 66                     | 0,789           | 0,702 |
| 13                     | 0,578           | 0,431 | 70                     | 0,804           | 0,724 |
| 14                     | 0,591           | 0,447 | 80                     | 0,817           | 0,741 |
| 15                     | 0,603           | 0,461 | 90                     | 0,827           | 0,756 |
| 16                     | 0,614           | 0,475 | 100                    | 0,836           | 0,767 |
| 17                     | 0,624           | 0,487 | 110                    | 0,843           | 0,778 |
| 18                     | 0,633           | 0,499 | 120                    | 0,850           | 0,788 |

Варианты задач  
Практическая работа №1

| Вариант | Уровень фактора | Значения параллельных опытов |                |                |                |                |
|---------|-----------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|         |                 | Y <sub>1</sub>               | Y <sub>2</sub> | Y <sub>3</sub> | Y <sub>4</sub> | Y <sub>5</sub> |
| 1       | X <sub>1</sub>  | 0,72                         | 0,60           | 0,65           | 0,32           | 0,80           |
|         | X <sub>2</sub>  | 0,15                         | 0,62           | 0,22           | 0,4            | 0,25           |
|         | X <sub>3</sub>  | 0,45                         | 0,30           | 0,50           | 0,58           | 0,48           |
|         | X <sub>4</sub>  | 1,20                         | 0,92           | 0,72           | 0,80           | 1,00           |
|         | X <sub>5</sub>  | 0,58                         | 0,98           | 0,70           | 1,00           | 0,48           |
| 2       | X <sub>1</sub>  | 98,50                        | 79,54          | 96,23          |                |                |
|         | X <sub>2</sub>  | 107,67                       | 111,98         | 130,12         |                |                |
|         | X <sub>3</sub>  | 119,09                       | 102,23         | 87,56          |                |                |
|         | X <sub>4</sub>  | 72,80                        | 64,70          | 88,60          |                |                |
|         | X <sub>5</sub>  | 87,45                        | 99,34          | 101,67         |                |                |
|         | X <sub>6</sub>  | 120,67                       | 134,78         | 130,07         |                |                |
|         | X <sub>7</sub>  | 130,76                       | 125,04         | 124,99         |                |                |
|         | X <sub>8</sub>  | 64,80                        | 79,53          | 98,05          |                |                |
| 3       | X <sub>1</sub>  | 5,32                         | 4,80           | 4,65           |                |                |
|         | X <sub>2</sub>  | 4,44                         | 5,25           | 4,80           |                |                |
|         | X <sub>3</sub>  | 4,58                         | 4,48           | 5,00           |                |                |
|         | X <sub>4</sub>  | 3,80                         | 4,00           | 4,12           |                |                |
|         | X <sub>5</sub>  | 6,0                          | 5,48           | 5,50           |                |                |
|         | X <sub>6</sub>  | 4,60                         | 4,52           | 3,99           |                |                |
|         | X <sub>7</sub>  | 5,52                         | 4,30           | 4,80           |                |                |
| 4       | X <sub>1</sub>  | 28,15                        | 26,50          | 25,90          | 25,28          | 27,00          |
|         | X <sub>2</sub>  | 28,90                        | 26,90          | 26,50          | 27,08          | 27,00          |
|         | X <sub>3</sub>  | 21,15                        | 21,40          | 18,30          | 17,00          | 21,30          |
|         | X <sub>4</sub>  | 28,10                        | 26,55          | 25,95          | 24,20          | 26,08          |
|         | X <sub>5</sub>  | 28,80                        | 26,70          | 27,60          | 26,08          | 27,05          |
| 5       | X1              | 8,15                         | 7,99           | 6,46           | 8,22           |                |
|         | X2              | 9,25                         | 9,12           | 5,99           | 8,96           |                |
|         | X3              | 7,99                         | 9,95           | 6,99           | 9,12           |                |
|         | X4              | 8,65                         | 8,97           | 7,00           | 8,75           |                |
|         | X5              | 8,30                         | 8,95           | 7,10           | 8,99           |                |
|         | X6              | 8,99                         | 8,60           | 6,95           | 9,15           |                |



Практическая работа №2

| Вариант     | Значения параметров |             |       |       |       |        |       |       |       |       |       |
|-------------|---------------------|-------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 1                   | $\bar{X}_i$ | 7,2   | 14,0  | 18,0  | 23,4   | 28,8  | 34,2  | 40,0  | 45,0  | 50,4  |
| $\bar{Y}_i$ |                     | 128,9       | 132,3 | 135,7 | 139,1 | 142,5  | 145,9 | 149,3 | 152,7 | 161,5 | 166,0 |
| 2           | $\bar{X}_i$         | 7,2         | 8,7   | 10,2  | 11,7  | 13,2   | 14,7  | 16,2  | 17,7  |       |       |
|             | $\bar{Y}_i$         | 37,04       | 43,34 | 49,64 | 55,94 | 62,24  | 68,54 | 74,84 | 81,14 |       |       |
| 3           | $\bar{X}_i$         | 21,24       | 19,44 | 17,64 | 15,84 | 14,04  | 12,24 | 10,44 | 8,64  | 5,5   |       |
|             | $\bar{Y}_i$         | 37,2        | 85,9  | 121,4 | 160,7 | 2,12,9 | 268,5 | 333,0 | 389,7 | 469,5 |       |
| 4           | $\bar{X}_i$         | 1           | 2     | 3     | 4     | 5      | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|             | $\bar{Y}_i$         | 1           | 1,5   | 3     | 4,5   | 7      | 5     | 4     | 3,5   | 2     | 1,5   |
| 5           | $\bar{X}_i$         | 6,2         | 9,7   | 12,2  | 13,7  | 14,2   | 15,7  | 16,2  | 17,7  | 19,8  |       |
|             | $\bar{Y}_i$         | 24,6        | 33,6  | 35,8  | 38,4  | 39,1   | 40,5  | 41,6  | 42,0  | 43,0  |       |

Практическая работа №5

| Вариант | Специ-<br>листы $m$ | Факторы ( $k$ ) |       |       |       |       |       |       |       |       |          |
|---------|---------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
|         |                     | $X_1$           | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ | $X_9$ | $X_{10}$ |
| 1       | 1                   | 8               | 10,5  | 10,5  | 10,5  | 1     | 2,5   | 2,5   | 10,5  | 5     | 4        |
|         | 2                   | 8               | 9     | 10    | 11    | 1     | 6,5   | 6,5   | 12    | 2     | 3        |
|         | 3                   | 6               | 7,5   | 7,5   | 11    | 2     | 4,5   | 4,5   | 12    | 1     | 3        |
|         | 4                   | 7               | 4     | 8     | 10,5  | 2     | 10,5  | 10,5  | 10,5  | 1     | 3        |
| 2       | 1                   | 10              | 8     | 7,5   | 8     | 8     | 9     | 11    | 3     | 8,5   | 10       |
|         | 2                   | 12              | 11    | 10    | 9,5   | 8     | 4     | 12    | 12    | 7     | 11       |
|         | 3                   | 4               | 5     | 3     | 5     | 1     | 11    | 4,5   | 3,5   | 4     | 5        |
|         | 4                   | 6               | 7     | 6,5   | 5,5   | 6     | 12    | 6     | 5,5   | 5,5   | 4        |
|         | 5                   | 1               | 2     | 3     | 4     | 1     | 1     | 12    | 1,5   | 4     | 3        |

|   |   |    |     |     |     |     |     |      |      |     |     |
|---|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|
| 3 | 1 | 5  | 9   | 8,5 | 8   | 9   | 6   | 9    | 7    | 10  | 6,5 |
|   | 2 | 3  | 2,5 | 4   | 3,5 | 8   | 2   | 4,5  | 3    | 5   | 2,5 |
|   | 3 | 10 | 9   | 2   | 9,5 | 8,5 | 3   | 8,5  | 8,5  | 7   | 8   |
|   | 4 | 2  | 2,5 | 3   | 1   | 1   | 2   | 3    | 2,5  | 10  | 4   |
|   | 5 | 10 | 8   | 7   | 9,5 | 9   | 2   | 9,5  | 8,5  | 8   | 8   |
|   | 6 | 3  | 2,5 | 3   | 7   | 2   | 2   | 2,5  | 5,5  | 3,5 | 4   |
| 4 | 1 | 12 | 12  | 10  | 6   | 7,5 | 9,5 | 10,5 | 11,5 | 8,5 | 10  |
|   | 2 | 10 | 8   | 7,5 | 11  | 6   | 8,5 | 10   | 5    | 9,5 | 12  |
|   | 3 | 6  | 7,5 | 3   | 1   | 7   | 9   | 6,5  | 12   | 5   | 4   |
|   | 4 | 2  | 3,5 | 7   | 5   | 10  | 6   | 5,5  | 4,5  | 8   | 7   |
|   | 5 | 6  | 4   | 5,5 | 7   | 2   | 4,5 | 6    | 3    | 6,5 | 2   |
| 5 | 1 | 11 | 8   | 4   | 8   | 8   | 9   | 9    | 3    | 2   |     |
|   | 2 | 12 | 11  | 10  | 4   | 8   | 6   | 10   | 11   | 5   |     |
|   | 3 | 5  | 10  | 3   | 7   | 1   | 10  | 2,5  | 3,5  | 6   |     |
|   | 4 | 7  | 11  | 6,5 | 5,5 | 8   | 12  | 6    | 5,5  | 2,5 |     |
|   | 5 | 1  | 12  | 3   | 10  | 1   | 7   | 12   | 8    | 4   |     |

### Практические работы №6,7

#### Вариант 1

| № опыта | $X_0$ | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1       | +     | -     | -     | -     | -     | 68    | 62    | 71    |
| 2       | +     | +     | -     | -     | -     | 71    | 78    | 75    |
| 3       | +     | -     | +     | -     | -     | 77    | 79    | 85    |
| 4       | +     | +     | +     | -     | -     | 100   | 115   | 120   |
| 5       | +     | -     | -     | +     | -     | 69    | 55    | 60    |
| 6       | +     | +     | -     | +     | -     | 71    | 75    | 65    |
| 7       | +     | -     | +     | +     | -     | 69    | 630   | 60    |
| 8       | +     | +     | +     | +     | -     | 79    | 85    | 90    |
| 9       | +     | -     | -     | -     | +     | 78    | 70    | 68    |
| 10      | +     | +     | -     | -     | +     | 80    | 85    | 90    |
| 11      | +     | -     | +     | -     | +     | 79    | 60    | 63    |
| 12      | +     | +     | +     | -     | +     | 60    | 55    | 59    |
| 13      | +     | -     | -     | +     | +     | 77    | 80    | 83    |
| 14      | +     | +     | -     | +     | +     | 79    | 83    | 80    |
| 15      | +     | -     | +     | +     | +     | 66    | 70    | 69    |
| 16      | +     | +     | +     | +     | +     | 75    | 77    | 85    |

### Вариант 2

| № опыта | $X_0$ | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1       | +     | -     | -     | -     | 67    | 60    | 70    |
| 2       | +     | +     | -     | -     | 70    | 75    | 72    |
| 3       | +     | -     | +     | -     | 75    | 79    | 80    |
| 4       | +     | +     | +     | -     | 100   | 115   | 120   |
| 5       | +     | -     | -     | +     | 69    | 55    | 60    |
| 6       | +     | +     | -     | +     | 71    | 75    | 65    |
| 7       | +     | -     | +     | +     | 69    | 630   | 60    |
| 8       | +     | +     | +     | +     | 79    | 85    | 90    |

### Вариант 3

| № опыта | $X_0$ | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1       | +     | -     | -     | -     | -     | 211   | 223   | 219   |
| 2       | +     | +     | -     | -     | -     | 200   | 224   | 216   |
| 3       | +     | -     | +     | -     | -     | 208   | 222   | 217   |
| 4       | +     | +     | +     | -     | -     | 210   | 215   | 210   |
| 5       | +     | -     | -     | +     | -     | 199   | 208   | 214   |
| 6       | +     | +     | -     | +     | -     | 196   | 210   | 212   |
| 7       | +     | -     | +     | +     | -     | 201   | 202   | 217   |
| 8       | +     | +     | +     | +     | -     | 215   | 210   | 220   |
| 9       | +     | -     | -     | -     | +     | 213   | 208   | 206   |
| 10      | +     | +     | -     | -     | +     | 208   | 199   | 210   |
| 11      | +     | -     | +     | -     | +     | 197   | 210   | 220   |
| 12      | +     | +     | +     | -     | +     | 202   | 208   | 212   |
| 13      | +     | -     | -     | +     | +     | 200   | 219   | 199   |
| 14      | +     | +     | -     | +     | +     | 197   | 223   | 189   |
| 15      | +     | -     | +     | +     | +     | 199   | 225   | 200   |
| 16      | +     | +     | +     | +     | +     | 204   | 210   | 214   |

### Вариант 4

| № опыта | $X_0$ | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1       | +     | -     | -     | -     | 1,54  | 1,76  | 1,70  |
| 2       | +     | +     | -     | -     | 1,67  | 1,59  | 1,40  |
| 3       | +     | -     | +     | -     | 1,45  | 1,70  | 1,75  |
| 4       | +     | +     | +     | -     | 1,49  | 1,60  | 1,65  |
| 5       | +     | -     | -     | +     | 1,58  | 1,67  | 1,44  |
| 6       | +     | +     | -     | +     | 1,65  | 1,55  | 1,71  |
| 7       | +     | -     | +     | +     | 1,55  | 1,80  | 1,69  |
| 8       | +     | +     | +     | +     | 1,45  | 1,87  | 1,67  |

### Вариант 5

| № опыта | $X_0$ | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1       | +     | -     | -     | -     | 23    | 24    | 25    |
| 2       | +     | +     | -     | -     | 19    | 17    | 20    |
| 3       | +     | -     | +     | -     | 22    | 19    | 18    |
| 4       | +     | +     | +     | -     | 23    | 23    | 25    |
| 5       | +     | -     | -     | +     | 16    | 17    | 19    |
| 6       | +     | +     | -     | +     | 19    | 25    | 20    |
| 7       | +     | -     | +     | +     | 20    | 19    | 19    |
| 8       | +     | +     | +     | +     | 24    | 25    | 17    |

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 268 с.
2. Володарский Е.Т., Малиновский Б.Н., Туз Ю.М. Планирование и организация измерительного эксперимента. – Киев: Вища школа, 1987. – 280 с.
3. Горский В.Г., Адлер Ю.П., Талалай А.М. Планирование промышленных экспериментов. – М.: Металлургия, 1978. – 112 с.
4. Зажигаев Л.С., Кашьян А.А., Романиков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.
5. Моргунов А.П., Ревина И.В. Планирование и обработка результатов эксперимента: Учеб. Пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. – 4304 с.
6. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
7. Ящерицын П.И., Махаринский Е.И. Планирование эксперимента в машиностроении. – Минск: Вышэйшая школа, 1985. – 286 с.

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В. И. ВЕРНАДСКОГО»**

**АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ**

**ФАКУЛЬТЕТ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭНЕРГЕТИКИ**

**АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ  
ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗОВ**

**Методические указания**

по выполнению практических занятий

направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства,  
направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны  
водных ресурсов»

Симферополь

2019

Аналитические и численные методы решения задач технической механики жидкости и газов: Методические указания к практическим занятиям для обучающихся направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов». – Симферополь, 2019. – 25 с.

Методические указания предназначены для обучающихся по направлению подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов». Указания содержат примеры расчета, индивидуальные задания, а также рекомендации по выполнению практических работ по аналитическим и численным методам решения задач технической механики жидкости и газов

Составители: Николенко И.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники.

Котовская Е.Е., старший преподаватель кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники.

Утверждено на заседании учебно-методической комиссии факультета водных ресурсов и энергетики от 24 апреля 2019 года, протокол № 8.

Одобрено на заседании кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники от 17 апреля 2019 года, протокол № 17.

© Николенко И.В., Котовская Е.Е., 2019

©ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского», АСиА, 2019

## **СОДЕРЖАНИЕ**

|  |    |
|--|----|
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....  | 4  |
| <b>1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФИЛЬТРОВАНИЯ</b> .....  | 5  |
| <b>ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ</b> .....   | 12 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b> КОЭФФИЦИЕНТ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ<br>ВЯЗКОСТИ $\nu$ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ $\cdot 10^{-8}, \text{м}^2 / \text{с}$ ..... | 24 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б</b> КОЭФФИЦИЕНТ ДИНАМИЧЕСКОЙ<br>ВЯЗКОСТИ $\mu$ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.....   | 24 |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ В</b> УДЕЛЬНЫЙ ВЕС ВОДЫ В ЗАВИСИМОСТИ<br>ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.....   | 24 |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....   | 25 |

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «*Специальные вопросы технической механики жидкости и газов*» является одной из основных цикла нормативных профессионально ориентированных дисциплин при подготовке обучающихся по направлению 08.03.01 Строительство. Водоснабжение и водоотведение, которым в практической деятельности при проектировании, монтаже, эксплуатации, ремонте современных систем водоснабжения и водоотведения приходится встречаться с решениями задач гидравлики различной сложности из разделов, которые не рассматриваются в общеинженерных курсах. Специальные вопросы гидравлики связаны с гидравлическими расчетами напорных и безнапорных потоков с переменным расходом по их длине, параметров и характеристик фильтрации, расчете сооружений для фильтрования воды и стоков при свободном и стесненном осаждении твердых частиц, расчете параметров потока в безнапорных цилиндрических водоотводных трубах, сопряжении бьефов в перепадных канализационных колодцах.

В методических указаниях приведены основные теоретические зависимости, даны справочные данные, с целью оказания помощи студентам, изучающим специальные вопросы гидравлики, выработать навыки применения теории в решении конкретных инженерных задач, а также освоить методики расчетов для конкретных задач по специальности.

Методические указания содержат разнообразные по тематике и степени сложности задачи для индивидуального решения, которые охватывают основные разделы курса. Каждый раздел методических указаний начинается с теоретической части, в которой приведены главные расчетные формулы, определения, а также справочные сведения, необходимые для решения задач по заданной теме. В приложениях приводятся материалы справочного характера, которые необходимы или могут оказаться полезными при решении задач.

Предлагаемые задачи в большинстве взяты из курсов по специальности: водоснабжение и водоотведение, с тем, чтобы максимально приблизить примеры к запросам направления подготовки.



## 1. ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФИЛЬТРОВАНИЯ

При рассмотрении закономерностей фильтрования под образованием осадка понимается не образование твердой фазы, как это принято в аналитической химии, а выделение твердой фазы из суспензии. При этом, осадок и фильтровальная перегородка рассматриваются как пористые среды, оказывающие сопротивление движущемуся через них ламинарному потоку жидкости.

**Фильтрование с образованием несжимаемого осадка на несжимаемой фильтровальной перегородке.**

*Несжимаемыми* называются такие осадки и перегородки, пористость которых и, сопротивление потоку жидкости остаются **постоянными** в процессе фильтрования. В реальных условиях фильтрования совершенно несжимаемые перегородки и осадки, не встречаются. К практически несжимаемым осадкам, можно отнести осадки, состоящие из частиц неорганических веществ размером более 100 мкм. Например, частицы песка, карбонатов кальция, бикарбоната натрия и др. К числу совершенно несжимаемых фильтровальных перегородок можно отнести металлические сетки, пористые керамические перегородки, а также перегородки из спекшихся минеральных или металлических порошков.

Закономерности фильтрования для несжимаемых сред записываются на основании уравнения закона Дарси, который хорошо согласуется с результатами экспериментов. Эти закономерности представляют процесс фильтрования в простом и наглядном виде, а также позволяют описать более сложные процессы фильтрования с учетом сжимаемости осадка и перегородки.

Согласно закону Дарси объем фильтрата, получаемый за малый промежуток времени с единицы поверхности фильтра, прямо пропорционален разности давлений и обратно пропорционален вязкости фильтрата и общему сопротивлению осадка и фильтровальной перегородки.

В дифференциальной форме эта зависимость записывается в виде:

$$\frac{dV}{S \cdot d\tau} = \frac{\Delta p}{\mu \cdot (R_{oc} + R_{\phi n})}, \quad (1.1)$$

где  $V$  – объем фильтрата,  $м^3$ ;  $S$  – поверхность фильтрования,  $м^2$ ;  $\tau$  – продолжительность фильтрования,  $сек$ ;  $\Delta p$  – разность давлений,  $Па(н/м^2)$ ;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкой фазы суспензии,  $Па \cdot сек$ ;  $R_{oc}$  – сопротивление слоя осадка,  $м^{-1}$ ;  $R_{\phi n}$  – сопротивление фильтровальной перегородки,  $м^{-1}$ .

Величина в левой части этого уравнения:

$$\frac{dV}{S \cdot d\tau} = W, \quad (1.2)$$

соответствует переменной скорости фильтрования, которая имеет размерность,  $м/с$ .

Сопротивление фильтровальной перегородки складывается из сопротивления самой перегородки с проникшими в нее ранее твердыми частицами суспензии и сопротивления тонкого слоя осадка, если он остался на перегородке после предварительного снятия с нее основного количества осадка. Величину  $R_{\phi n}$  в процессе фильтрования в первом приближении можно принимать постоянной, пренебрегая некоторым возможным ее увеличением вследствие проникания в поры перегородки новых твердых частиц. Сопротивление слоя осадка с увеличением его количества изменяется от нуля в начале фильтрования до максимального значения в конце процесса.

Чтобы проинтегрировать уравнение (1.1), необходимо установить зависимость между сопротивлением слоя осадка и объемом полученного фильтрата. Для этого введем безразмерную величину  $x_0$  равную отношению объема осадка к объему фильтрата. Учитывая пропорциональность объемов осадка и фильтрата, определим толщину равномерного слоя осадка на фильтровальной перегородке:

$$h_{oc} = x_0 \cdot \frac{V}{S}, \quad (1.3)$$

С учетом этого обозначения определим сопротивление слоя осадка:

$$R_{oc} = r_0 \cdot h_{oc} = r_0 \cdot x_0 \cdot \frac{V}{S}, \quad (1.4)$$

где  $r_0$  – удельное объемное сопротивление осадка, (сопротивление, которое оказывает равномерный слой осадка толщиной 1 м потоку фильтрата),  $м^{-2}$ .

Подставив это значение  $R_{oc}$  в равенство (1.1), получим **основное дифференциальное уравнение фильтрования с образованием несжимаемого осадка на несжимаемой перегородке:**

$$\frac{dV}{S \cdot d\tau} = \frac{\Delta p}{\mu \cdot \left( r_0 \cdot x_0 \cdot \frac{V}{S} + R_{\phi n} \right)}, \quad (1.5)$$

Для несжимаемых осадков и перегородок в уравнении (1.5)  $r_0$ ,  $x_0$ ,  $R_{\phi n}$  – величины постоянны, следовательно, не зависят от изменения разности давления на фильтровальной перегородке  $\Delta p$ . Поэтому для описания процесса фильтрования достаточно разделить переменные и проинтегрировать уравнение (1.5) для известных начальных условий. При интегрировании уравнения (1.5) необходимо принимать во внимание условия процесса фильтрования, который может протекать при следующих условиях:

- с постоянной разностью давлений  $\Delta p = const$  на фильтровальной перегородке;
- с постоянной скоростью фильтрования  $W = const$ ;
- с постоянной разностью давлений и скоростью фильтрования;
- при переменных разности давлений и скорости фильтрования.

Фильтрование *при постоянной разности давлений*  $\Delta p = const$  осуществляется при использовании постоянной величины вакуума за фильтром и реже за счет давления сжатого воздуха или другого газа; либо под воздействием постоянного гидростатического давления исходной суспензии до фильтра.

Фильтрование *при постоянной скорости*  $W = const$  происходит, когда разделяемая суспензия подается на фильтр объемным насосом; однако при достижении некоторого предела, зависящего, в частности от прочности фильтра, дальнейшее повышение давления для поддержания постоянной скорости процесса становится недопустимым и разделение суспензии протекает затем в условиях приблизительно постоянной разности давлений.

Фильтрование при постоянных разности давлений и скорости возможно только при неизменной толщине слоя осадка на фильтре; такой процесс осуществляется в лаборатории при проведении исследовательских работ и в производстве при промывке осадка на фильтре.

Фильтрование при переменных разности давлений и скорости происходит, когда суспензия подается на фильтр центробежным насосом, в соответствии с его напорной характеристикой.

Уменьшение скорости фильтрования  $W$  при постоянной разности давлений  $\Delta p$  и возрастание этой разности давлений при фильтровании с постоянной скоростью  $W$  обусловлены повышением сопротивления осадка  $R_{oc}$  в результате увеличения его толщины  $h_{oc}$ , которая пропорциональна отношению  $x_0$  и объему фильтрата  $V$ .

При  $\Delta p = const$  все величины в уравнении (1.5), за исключением  $V$  и  $\tau$ , постоянны. После разделения переменных получаем дифференциальное уравнение для этого случая фильтрования:

$$\frac{dV}{S} \cdot \mu \cdot \left( r_0 \cdot x_0 \cdot \frac{V}{S} + R_{\phi n} \right) = \Delta p \cdot d\tau$$

После интегрирования правой части полученного уравнения в пределах от 0 до  $V$ , а левой части в пределах от 0 до  $\tau$ , и простейших преобразований получается следующее уравнение фильтрования с образованием несжимаемого осадка на несжимаемой фильтровальной перегородке **при постоянной разности давлений**:

$$V^2 + 2 \cdot \frac{R_{\phi n} \cdot S}{r_0 \cdot x_0} \cdot V = 2 \cdot \frac{\Delta p \cdot S^2}{\mu \cdot r_0 \cdot x_0} \cdot \tau, \quad (1.6)$$

Для получения дифференциального уравнения для случая фильтрования при постоянной скорости  $W = const$  и постоянной площади поверхности фильтрования  $S$  производную  $dV/d\tau$  можно заменить равным отношением конечных величин  $V/\tau$ , то есть  $dV/d\tau \approx V/\tau$ . После такой замены и преобразований уравнение (1.5) принимает вид:

$$\Delta p = \mu \cdot r_0 \cdot x_0 \cdot \frac{V^2}{S^2 \cdot \tau} + \mu \cdot R_{\phi n} \cdot \frac{V}{S \cdot \tau}, \quad (1.7)$$

Умножив и разделив первое слагаемое правой части этого уравнения на величину  $\tau$  и приняв во внимание, что постоянная скорость фильтрования:

$$W = \frac{V}{S \cdot \tau}, \quad (1.8)$$

получим уравнение фильтрования с образованием несжимаемого осадка на несжимаемой фильтровальной перегородке при постоянной скорости процесса:

$$\Delta p = \mu \cdot r_0 \cdot x_0 \cdot W^2 \cdot \tau + \mu \cdot R_{\phi n} \cdot W, \quad (1.9)$$

С помощью этого уравнения можно определить при заданной скорости фильтрования  $W$  время в течение, которого разность давлений  $\Delta p$  достигнет максимально допустимой величины  $\Delta p_{\max}$ .

При заданном значении площади поверхности фильтрования  $S$  скорость  $W$  определяется по уравнению (1.8), в которой производительность фильтра  $\frac{V}{\tau} = Q$  соответствует постоянной производительности насоса, подающего суспензию на фильтр.

После простейших преобразований уравнение (1.7) приводится к виду:

$$V^2 + \frac{R_{\phi n} \cdot S}{r_0 \cdot x_0} \cdot V = \frac{\Delta p \cdot S^2}{\mu \cdot r_0 \cdot x_0} \cdot \tau, \quad (1.10)$$

Полученное уравнение аналогично уравнению (1.6), отличается от него только отсутствием двух коэффициентов 2. В уравнении (1.10) величина  $\Delta p$  имеет максимальное значение, соответствующее концу фильтрования при постоянной скорости процесса. Это уравнение содержит **три переменные** ( $V$ ,  $\tau$ ,  $\Delta p$ ) и потому менее удобно для решения практических вопросов, чем уравнение (1.9), которое непосредственно определяет зависимость между  $\Delta p$  и  $\tau$ .

Сопоставим уравнения (1.6) и (1.10) для несжимаемого осадка при условиях, что сопротивление фильтровальной перегородки  $R_{\phi n} = 0$ , а величина перепада давления на фильтре при постоянной разности давлений  $\Delta p = const$  равна значению  $\Delta p_{max}$  в конце фильтрования при постоянной скорости. В этом случае для получения одного и того же объема фильтрата  $V$  при постоянной разности давлений требуется в 2 раза меньше времени, чем при постоянной скорости фильтрования. Это отношение уменьшается при использовании фильтровальной перегородки  $R_{\phi n} \neq 0$  со значительным сопротивлением.

Фильтрование при постоянной разности давлений  $\Delta p = const$  и одновременно при постоянной скорости процесса  $W = const$  можно осуществить, если перед началом фильтрования суспензия расслаивается под действием силы тяжести, причем на горизонтальной фильтровальной перегородке образуются нижний слой осадка и верхний слой чистой жидкости.

В рассматриваемом случае для вывода уравнения фильтрования в уравнение (1.5) следует ввести величину постоянной толщины слоя осадка  $h_{oc}$ , полученного в результате расслаивания определенного объема суспензии с образованием чистой жидкости в количестве

$V$ . Поскольку  $h_{oc} = x_0 \cdot \frac{V}{S}$ ;  $\Delta p = const$ ;  $dV/d\tau \approx V/\tau$ , то после введения в уравнение (1.5) величины  $h_{oc}$  и некоторых образований находим:

$$V = \frac{\Delta p \cdot S}{\mu(r_0 \cdot h_{oc} + R_{\phi n})} \cdot \tau, \quad (1.11)$$

Это уравнение дает зависимость объема фильтрата от продолжительности фильтрования чистой жидкости через слой заранее полученного осадка. Приняв  $R_{\phi n} = 0$ , сопоставим процессы получения одного и того же количества фильтрата  $V$  без предварительного

расслаивания суспензии и с предварительным ее расслаиванием. уравнения (1.3). В результате получим: Для этого подставим в уравнение (1.11) значение величины  $h_{oc}$  из:

$$V^2 = \frac{\Delta p \cdot S^2}{\mu \cdot r_0 \cdot x_0} \cdot \tau, \quad (1.12)$$

Сравнивая это выражение с уравнением (1.6) при  $R_{\phi n} = 0$ , видим, что для получения одного и того же объема фильтрата  $V$  при разделении предварительно расслоившейся суспензии требуется **в 2 раза** больше времени, чем при разделении нерасслоившейся суспензии. Это отношение уменьшается при использовании фильтровальной перегородки со значительным сопротивлением.

Из сказанного можно сделать вывод, что осаждение твердых частиц суспензии под действием силы тяжести приводит **к увеличению продолжительности фильтрования.**

Для решения в общем виде уравнения фильтрования при переменной разности давлений и одновременно при переменной скорости процесса находят среднюю **эквивалентную** разность давлений по зависимости:

$$\Delta p_{\text{экс}} = \frac{\int_0^{\tau} \Delta p(\tau) \cdot d\tau}{\tau}, \quad (1.13)$$

где  $\Delta p(\tau)$  - зависимость разности давления на фильтре от времени.

Полученное значение средней **эквивалентной** разности давления подставляется в уравнения фильтрования (1.6) или (1.11) при постоянной разности давления.

Процесс фильтрования в некоторых случаях целесообразно рассматривать по отношению к  $1 \text{ м}^2$  поверхности фильтрования для величины, соответствующей количеству фильтрата полученного с  $1 \text{ м}^2$  поверхности:

$$q = \frac{V}{S}. \quad (1.14)$$

С учетом этого уравнение (1.6) фильтрования с образованием несжимаемого осадка на несжимаемой фильтровальной перегородке при постоянной разности давлений примет вид:

$$q^2 + 2 \cdot \frac{R_{\phi n}}{r_0 \cdot x_0} \cdot q = 2 \cdot \frac{\Delta p}{\mu \cdot r_0 \cdot x_0} \cdot \tau, \quad (1.15)$$

В случае пренебрежения сопротивлением фильтрующей перегородки:

$$q^2 = 2 \cdot \frac{\Delta p}{\mu \cdot r_0 \cdot x_0} \cdot \tau. \quad (1.16)$$

Зависимость продолжительности фильтрования при постоянной разности давлений и бесконечно малом сопротивлении перегородки  $R_{\phi n} \approx 0$  записывается в виде:

$$\tau = \frac{\mu \cdot r_0 \cdot x_0}{2 \cdot \Delta p} \cdot q^2 \quad (1.17)$$

Продолжительность фильтрования при постоянной разности давлений несжимаемого осадка и перегородки:

$$\tau = \frac{\mu \cdot r_0 \cdot x_0}{2 \cdot \Delta p} \cdot q^2 + \frac{\mu \cdot R_{\phi n}}{\Delta p} \cdot q \quad (1.18)$$

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:

### Задача 1

Суспензия частиц твердого вещества в воде при  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  с динамической вязкостью  $\mu = 10^{-3}\text{ Па}\cdot\text{с}$  разделяется фильтрованием при постоянной разности давлений на периодически действующем фильтре с поверхностью фильтрования  $S = 1\text{ м}^2$ . В течение каждой операции фильтрования разделяется объем  $V_c = 0,5\text{ м}^3$  суспензии. Отношение объема осадка к объему фильтрата  $x_0 = 0,01$ . Сопротивлением фильтровальной перегородки ввиду его небольшой величины можно считать  $R_{\phi n} = 0$ . Выделяемое вещество состоит из сжимаемого осадка, для которого зависимость удельного объемного сопротивления от разности давлений принимается в виде  $r_0 = r_{0p} \cdot (\Delta p)^{s_p}$ , где  $r_{0p} = 0,5 \cdot 10^{10}$ ,  $s_p = 0,95$ .

Установить зависимость продолжительности фильтрования от разности давлений при диапазоне перепада давления на фильтре  $\Delta p = 0,04 \dots 0,08\text{ МПа}$ , объем и толщину образовавшегося осадка на фильтре для исходных данных из таблицы 1.1.

Таблица 1.1.

| Вариант | Заданная величина  |                  |       |   |       |                                       |
|---------|--------------------|------------------|-------|---|-------|---------------------------------------|
|         | $V_c, \text{ м}^3$ | $S, \text{ м}^2$ | $x_0$ | $r_{0p} \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-1}$ | $s_p$ | $\Delta p \cdot 10^{-4}, \text{ МПа}$ |
| 0       | 0,55               | 0,8              | 0,16  | 0,4                                     | 0,4   | 3...7                                 |
| 1       | 0,6                | 0,53             | 0,14  | 0,43                                    | 0,45  | 4...8                                 |
| 2       | 0,65               | 0,56             | 0,12  | 0,46                                    | 0,5   | 5...9                                 |
| 3       | 0,7                | 0,59             | 0,1   | 0,49                                    | 0,55  | 6...11                                |
| 4       | 0,75               | 0,62             | 0,098 | 0,52                                    | 0,6   | 7...12                                |
| 5       | 0,8                | 0,65             | 0,096 | 0,55                                    | 0,65  | 8...13                                |
| 6       | 0,85               | 0,68             | 0,094 | 0,58                                    | 0,7   | 9...14                                |
| 7       | 0,9                | 0,71             | 0,092 | 0,61                                    | 0,75  | 10...15                               |
| 8       | 0,95               | 0,74             | 0,09  | 0,64                                    | 0,8   | 11...16                               |



|    |      |      |       |      |      |         |
|----|------|------|-------|------|------|---------|
| 9  | 1,0  | 0,77 | 0,088 | 0,67 | 0,85 | 12...17 |
| 10 | 0,57 | 0,8  | 0,16  | 0,4  | 0,4  | 3...7   |
| 11 | 0,62 | 0,53 | 0,14  | 0,43 | 0,45 | 4...8   |
| 12 | 0,63 | 0,56 | 0,12  | 0,46 | 0,5  | 5...9   |

Продолжение табл. 1.1

| Вариант | Заданная величина |          |       |                                 |       |                               |
|---------|-------------------|----------|-------|---------------------------------|-------|-------------------------------|
|         | $V_c, м^3$        | $S, м^2$ | $x_0$ | $r_{0p} \cdot 10^{-10}, м^{-2}$ | $s_p$ | $\Delta p \cdot 10^{-4}, МПа$ |
| 13      | 0,72              | 0,59     | 0,1   | 0,49                            | 0,55  | 6...11                        |
| 14      | 0,74              | 0,62     | 0,098 | 0,52                            | 0,6   | 7...12                        |
| 15      | 0,82              | 0,65     | 0,096 | 0,55                            | 0,65  | 8...13                        |
| 16      | 0,86              | 0,68     | 0,094 | 0,58                            | 0,7   | 9...14                        |
| 17      | 0,91              | 0,71     | 0,092 | 0,61                            | 0,75  | 10...15                       |
| 18      | 0,96              | 0,74     | 0,09  | 0,64                            | 0,8   | 11...16                       |
| 19      | 1,0               | 0,77     | 0,088 | 0,67                            | 0,85  | 12...17                       |
| 20      | 0,55              | 0,8      | 0,16  | 0,4                             | 0,4   | 3...7                         |
| 21      | 0,6               | 0,53     | 0,14  | 0,4                             | 0,4   | 3...7                         |
| 22      | 0,65              | 0,56     | 0,12  | 0,43                            | 0,45  | 4...8                         |
| 23      | 0,7               | 0,59     | 0,1   | 0,46                            | 0,5   | 5...9                         |
| 24      | 0,75              | 0,62     | 0,098 | 0,49                            | 0,55  | 6...11                        |
| 25      | 0,8               | 0,65     | 0,096 | 0,46                            | 0,5   | 5...9                         |

### Задача 2

Суспензия частиц твердого вещества в воде при  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  с динамической вязкостью  $\mu = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$  разделяется фильтрованием при постоянной разности давлений на периодически действующем фильтре с поверхностью фильтрования  $S = 1 \text{ м}^2$ . В течение каждой операции фильтрования разделяется объем  $V_c = 0,5 \text{ м}^3$  суспензии. Отношение объема осадка к объему фильтрата  $x_0 = 0,01$ . Сопротивлением фильтровальной перегородки  $R_{\phi n} = 5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$ . Выделяемое вещество состоит из сжимаемого осадка, для которого

зависимость удельного объемного сопротивления от разности давлений принимается в виде

$$r_0 = r_{0p} \cdot (\Delta p)^{s_p}, \text{ где } r_{0p} = 0,5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}, s_p = 0,95.$$

Установить зависимость продолжительности фильтрования от разности давлений при диапазоне перепада давления на фильтре  $\Delta p = 0,04 \dots 0,08 \text{ МПа}$ , толщину образовавшегося осадка на фильтре для исходных данных из таблицы 1.2.

Таблица 1.2.

| Вариант | Заданная величина  |                  |       |   |       |                                      |   |
|---------|--------------------|------------------|-------|---|-------|--------------------------------------|---|
|         | $V_c, \text{ м}^3$ | $S, \text{ м}^2$ | $x_0$ | $r_{0p} \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-2}$ | $s_p$ | $\Delta p \cdot 10^{-4}, \text{ Па}$ | $R_{\phi n} \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-1}$ |
| 0       | 0,55               | 0,8              | 0,16  | 0,4                                     | 0,4   | 3...7                                | 4,1   |
| 1       | 0,6                | 0,53             | 0,14  | 0,43                                    | 0,45  | 4...8                                | 4,3   |
| 2       | 0,65               | 0,56             | 0,12  | 0,46                                    | 0,5   | 5...9                                | 4,5   |
| 3       | 0,7                | 0,59             | 0,1   | 0,49                                    | 0,55  | 6...11                               | 4,7   |
| 4       | 0,75               | 0,62             | 0,098 | 0,52                                    | 0,6   | 7...12                               | 4,9   |
| 5       | 0,8                | 0,65             | 0,096 | 0,55                                    | 0,65  | 8...13                               | 5,1   |
| 6       | 0,85               | 0,68             | 0,094 | 0,58                                    | 0,7   | 9...14                               | 5,3   |
| 7       | 0,9                | 0,71             | 0,092 | 0,61                                    | 0,75  | 10...15                              | 5,4   |
| 8       | 0,95               | 0,74             | 0,09  | 0,64                                    | 0,8   | 11...16                              | 5,7   |
| 9       | 1,0                | 0,77             | 0,088 | 0,67                                    | 0,85  | 12...17                              | 5,9   |
| 10      | 0,55               | 0,8              | 0,16  | 0,4                                     | 0,4   | 3...7                                | 4,1   |
| 11      | 0,6                | 0,53             | 0,14  | 0,43                                    | 0,45  | 4...8                                | 4,3   |
| 12      | 0,65               | 0,56             | 0,12  | 0,46                                    | 0,5   | 5...9                                | 4,5   |
| 13      | 0,7                | 0,59             | 0,1   | 0,49                                    | 0,55  | 6...11                               | 4,7   |
| 14      | 0,75               | 0,62             | 0,098 | 0,52                                    | 0,6   | 7...12                               | 4,9   |
| 15      | 0,8                | 0,65             | 0,096 | 0,55                                    | 0,65  | 8...13                               | 5,1   |
| 16      | 0,85               | 0,68             | 0,094 | 0,58                                    | 0,7   | 9...14                               | 5,3   |
| 17      | 0,9                | 0,71             | 0,092 | 0,61                                    | 0,75  | 10...15                              | 5,4   |
| 18      | 0,95               | 0,74             | 0,09  | 0,64                                    | 0,8   | 11...16                              | 5,7   |
| 19      | 1,0                | 0,77             | 0,088 | 0,67                                    | 0,85  | 12...17                              | 5,9   |
| 20      | 0,95               | 0,74             | 0,09  | 0,64                                    | 0,8   | 11...16                              | 5,7   |

|    |      |      |       |      |      |         |     |
|----|------|------|-------|------|------|---------|-----|
| 21 | 1,0  | 0,77 | 0,088 | 0,67 | 0,85 | 12...17 | 5,9 |
| 22 | 0,55 | 0,8  | 0,16  | 0,4  | 0,4  | 3...7   | 4,1 |
| 23 | 0,6  | 0,53 | 0,14  | 0,43 | 0,45 | 4...8   | 4,3 |
| 24 | 0,65 | 0,56 | 0,12  | 0,46 | 0,5  | 5...9   | 4,5 |
| 25 | 0,7  | 0,59 | 0,1   | 0,49 | 0,55 | 6...11  | 4,7 |

### Задача 3

*(По заданному времени и давлению определить объем фильтрата, толщину слоя осадка)*

Водная суспензия твердого вещества разделяется при температуре  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$  (динамическая вязкость  $\mu = 10^{-3}\text{ Па}\cdot\text{с}$ ) фильтрованием с образованием несжимаемого осадка на несжимаемой фильтровальной перегородке с постоянной разностью давления  $\Delta p = 0,2\text{ МПа}$ . Продолжительность одного цикла фильтрования принять в диапазоне времени  $\tau = 60 \dots 120\text{ с}$ . Площадь поверхности фильтрования  $S = 1\text{ м}^2$ , сопротивлению фильтровальной перегородки  $R_{\phi} = 5 \cdot 10^8\text{ м}^{-1}$ , отношение объема осадка к объему фильтрата  $x_0 = 0,0025$ , удельное объемное сопротивление осадка  $r_o = 0,1 \cdot 10^{10}\text{ м}^{-2}$ .

Определить зависимость объема фильтрата и толщины слоя осадка на фильтровальной перегородке  $h_o$  от времени цикла.

Таблица 1.3

| Вариант | Заданная величина                           |                  |        |                                      |                                      |                     |
|---------|---|------------------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|
|         | $R_{\phi n} \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-1}$ | $S, \text{ м}^2$ | $x_0$  | $r_o \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-2}$ | $\Delta p \cdot 10^{-4}, \text{ Па}$ | $\tau, \text{ сек}$ |
| 0       | 3,5   | 1,8              | 0,016  | 0,4                                  | 3                                    | 40...80             |
| 1       | 4,0   | 1,53             | 0,014  | 0,43                                 | 4                                    | 45...90             |
| 2       | 4,5   | 1,56             | 0,012  | 0,46                                 | 5                                    | 50...100            |
| 3       | 5,0   | 1,59             | 0,01   | 0,49                                 | 6                                    | 55...110            |
| 4       | 5,5   | 1,62             | 0,0098 | 0,52                                 | 7                                    | 60...120            |
| 5       | 6,0   | 1,65             | 0,0096 | 0,55                                 | 8                                    | 65...130            |
| 6       | 6,5   | 1,68             | 0,0094 | 0,58                                 | 9                                    | 70...140            |
| 7       | 7,0   | 1,71             | 0,0092 | 0,61                                 | 10                                   | 75...150            |
| 8       | 7,5   | 1,74             | 0,009  | 0,64                                 | 11                                   | 80...160            |
| 9       | 8,0   | 1,77             | 0,0088 | 0,67                                 | 12                                   | 85...170            |

|    |     |      |        |      |   |          |
|----|-----|------|--------|------|---|----------|
| 10 | 3,5 | 1,8  | 0,016  | 0,4  | 3 | 40...80  |
| 11 | 4,0 | 1,53 | 0,014  | 0,43 | 4 | 45...90  |
| 12 | 4,5 | 1,56 | 0,012  | 0,46 | 5 | 50...100 |
| 13 | 5,0 | 1,59 | 0,01   | 0,49 | 6 | 55...110 |
| 14 | 5,5 | 1,62 | 0,0098 | 0,52 | 7 | 60...120 |
| 15 | 6,0 | 1,65 | 0,0096 | 0,55 | 8 | 65...130 |
| 16 | 6,5 | 1,68 | 0,0094 | 0,58 | 9 | 70...140 |

Продолжение табл. 1.3

| Вариант | Заданная величина                   |          |        |                              |                              |             |
|---------|-------------------------------------|----------|--------|------------------------------|------------------------------|-------------|
|         | $R_{\phi n} \cdot 10^{-10}, M^{-1}$ | $S, M^2$ | $x_0$  | $r_0 \cdot 10^{-10}, M^{-2}$ | $\Delta p \cdot 10^{-4}, Pa$ | $\tau, сек$ |
| 17      | 7,0                                 | 1,71     | 0,0092 | 0,61                         | 10                           | 75...150    |
| 18      | 3,5                                 | 1,8      | 0,016  | 0,4                          | 3                            | 40...80     |
| 19      | 4,0                                 | 1,53     | 0,014  | 0,43                         | 4                            | 45...90     |
| 20      | 4,5                                 | 1,56     | 0,012  | 0,46                         | 5                            | 50...100    |
| 21      | 5,0                                 | 1,59     | 0,01   | 0,49                         | 6                            | 55...110    |
| 22      | 5,5                                 | 1,62     | 0,0098 | 0,52                         | 7                            | 60...120    |
| 23      | 6,0                                 | 1,65     | 0,0096 | 0,55                         | 8                            | 65...130    |
| 24      | 6,5                                 | 1,68     | 0,0094 | 0,58                         | 9                            | 70...140    |
| 25      | 7,0                                 | 1,71     | 0,0092 | 0,61                         | 10                           | 75...150    |

#### **Задача 4**

*(По объему фильтрата и времени определить необходимое давление)*

Определить зависимость необходимого перепада давления  $\Delta p$  от времени в диапазоне  $\tau = 60...120c$  для фильтрования суспензии твердого вещества в воде при  $t = 20^\circ C$  с динамической вязкостью  $\mu = 10^{-3} Pa \cdot c$ . Суспензия разделяется фильтрованием при постоянной разности давлений на периодически действующем фильтре с поверхностью  $S = 0,5 M^2$  с образованием несжимаемого осадка на несжимаемой фильтровальной перегородке с постоянной разностью давлений. Рассмотреть продолжительность одного цикла фильтрования в диапазоне времени  $\tau = 60...120c$ , при котором разделяется объем суспензии  $V_c = 2 M^3$ . Отношение объема осадка к объему фильтрата  $x_0 = 0,01$ . Сопротивлением фильтровальной перегородки ввиду его небольшой величины не учитываем

( $R_{\phi^n=0}$ ). Выделяемое вещество состоит из сжимаемого осадка, для которого зависимость удельного объемного сопротивления от разности давлений принимается в виде

$$r_0 = r_{0p} \cdot (\Delta p)^{s_p}, \text{ где } r_{0p} = 5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}, s_p = 0,1.$$

Установить зависимость необходимого перепада давления  $\Delta p$  от продолжительности цикла фильтрования для исходных данных из таблицы 1.4.

Таблица 1.4

| Вариант | Заданная величина  |                  |        |                                      |       |                   |
|---------|--------------------|------------------|--------|--------------------------------------|-------|-------------------|
|         | $V_c, \text{ м}^3$ | $S, \text{ м}^2$ | $x_0$  | $r_0 \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-2}$ | $s_p$ | $\tau, \text{ с}$ |
| 0       | 2,55               | 0,8              | 0,016  | 4,0                                  | 0,5   | 40... 80          |
| 1       | 2,6                | 0,53             | 0,014  | 4,3                                  | 0,55  | 45... 90          |
| 2       | 2,65               | 0,56             | 0,012  | 4,6                                  | 0,6   | 50... 100         |
| 3       | 2,7                | 0,59             | 0,01   | 4,9                                  | 0,65  | 55... 110         |
| 4       | 2,75               | 0,62             | 0,0098 | 5,2                                  | 0,7   | 60... 120         |
| 5       | 2,8                | 0,65             | 0,0096 | 5,5                                  | 0,75  | 65... 130         |
| 6       | 2,85               | 0,68             | 0,0094 | 5,8                                  | 0,8   | 70... 140         |
| 7       | 2,9                | 0,71             | 0,0092 | 6,1                                  | 0,85  | 75... 150         |
| 8       | 2,95               | 0,74             | 0,009  | 6,4                                  | 0,9   | 80... 160         |
| 9       | 3,0                | 0,77             | 0,0088 | 6,7                                  | 0,95  | 85... 170         |
| 10      | 2,55               | 0,8              | 0,016  | 4,0                                  | 0,5   | 40... 80          |
| 11      | 2,6                | 0,53             | 0,014  | 4,3                                  | 0,55  | 45... 90          |
| 12      | 2,65               | 0,56             | 0,012  | 4,6                                  | 0,6   | 50... 100         |
| 13      | 2,7                | 0,59             | 0,01   | 4,9                                  | 0,65  | 55... 110         |
| 14      | 2,75               | 0,62             | 0,0098 | 5,2                                  | 0,7   | 60... 120         |
| 15      | 2,8                | 0,65             | 0,0096 | 5,5                                  | 0,75  | 65... 130         |
| 16      | 2,85               | 0,68             | 0,0094 | 5,8                                  | 0,8   | 70... 140         |
| 17      | 2,9                | 0,71             | 0,0092 | 6,1                                  | 0,85  | 75... 150         |
| 18      | 2,95               | 0,74             | 0,009  | 6,4                                  | 0,9   | 80... 160         |
| 19      | 3,0                | 0,77             | 0,0088 | 6,7                                  | 0,95  | 85... 170         |
| 20      | 2,75               | 0,62             | 0,0098 | 5,2                                  | 0,7   | 60... 120         |
| 21      | 2,8                | 0,65             | 0,0096 | 5,5                                  | 0,75  | 65... 130         |

|    |      |      |        |     |      |          |
|----|------|------|--------|-----|------|----------|
| 22 | 2,85 | 0,68 | 0,0094 | 5,8 | 0,8  | 70...140 |
| 23 | 2,9  | 0,71 | 0,0092 | 6,1 | 0,85 | 75...150 |
| 24 | 2,95 | 0,74 | 0,009  | 6,4 | 0,9  | 80...160 |
| 25 | 3,0  | 0,77 | 0,0088 | 6,7 | 0,95 | 85...170 |

### Задача 5

Водная суспензия частиц твердого вещества разделяется с постоянной скоростью фильтрования на периодически действующем фильтре с поверхностью  $S = 1 \text{ м}^2$  при  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , (при этой температуре вязкость воды  $\mu = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ). Наибольшая допустимая разность давлений составляет  $\Delta p = 0,2 \text{ МПа}$ . Сопротивление фильтровальной перегородки  $R_{\phi} = 5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$  можно считать независимым от разности давлений. Отношение объема осадка к объему фильтрата в среднем составляет  $x_0 = 0,025$ . Постоянная производительность по фильтрату равна  $Q = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . Выделяемое вещество состоит из сжимаемого осадка, для которого экспериментально найдена зависимость удельного объемного сопротивления от разности давлений в виде  $r_0 = r_{0p} \cdot (\Delta p)^{s_p}$ , где  $r_{0p} = 12,5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}$ ,  $s_p = 0,5$ .

Определить продолжительность одной операции фильтрования, объем собранного фильтрата и толщину образовавшегося осадка. Установить графическую зависимость разности давления на фильтре от времени фильтрования.

Таблица 1.5

| Вариант | Заданная величина                           |                  |        |                                      |       |   |                                      |
|---------|---|------------------|--------|--------------------------------------|-------|---|--------------------------------------|
|         | $R_{\phi n} \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-1}$ | $S, \text{ м}^2$ | $x_0$  | $r_0 \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-2}$ | $s_p$ | $Q \cdot 10^3, \frac{\text{ м}^3}{\text{ с}}$ | $\Delta p \cdot 10^{-4}, \text{ Па}$ |
| 0       | 3,5   | 1,8              | 0,016  | 14,0                                 | 0,5   | 0,39  | 10                                   |
| 1       | 4,0   | 1,53             | 0,014  | 14,3                                 | 0,55  | 0,38  | 13                                   |
| 2       | 4,5   | 1,56             | 0,012  | 14,6                                 | 0,6   | 0,37  | 16                                   |
| 3       | 5,0   | 1,59             | 0,01   | 14,9                                 | 0,65  | 0,36  | 19                                   |
| 4       | 5,5   | 1,62             | 0,0098 | 15,2                                 | 0,7   | 0,35  | 22                                   |

|    |     |      |        |      |      |      |    |
|----|-----|------|--------|------|------|------|----|
| 5  | 6,0 | 1,65 | 0,0096 | 15,5 | 0,75 | 0,34 | 25 |
| 6  | 6,5 | 1,68 | 0,0094 | 15,8 | 0,8  | 0,33 | 28 |
| 7  | 7,0 | 1,71 | 0,0092 | 16,1 | 0,85 | 0,32 | 31 |
| 8  | 7,5 | 1,74 | 0,009  | 16,4 | 0,9  | 0,31 | 34 |
| 9  | 8,0 | 1,77 | 0,0088 | 16,7 | 0,95 | 0,3  | 37 |
| 10 | 5,5 | 1,62 | 0,0098 | 15,2 | 0,7  | 0,35 | 22 |
| 11 | 6,0 | 1,65 | 0,0096 | 15,5 | 0,75 | 0,34 | 25 |
| 12 | 6,5 | 1,68 | 0,0094 | 15,8 | 0,8  | 0,33 | 28 |

Продолжение табл. 1.5

| Вариант | Заданная величина                           |                  |        |                                      |       |   |                                      |
|---------|---|------------------|--------|--------------------------------------|-------|---|--------------------------------------|
|         | $R_{\phi n} \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-1}$ | $S, \text{ м}^2$ | $x_0$  | $r_0 \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-2}$ | $s_p$ | $Q \cdot 10^3, \frac{\text{ м}^3}{\text{ с}}$ | $\Delta p \cdot 10^{-4}, \text{ Па}$ |
| 13      | 3,5   | 1,8              | 0,016  | 14,0                                 | 0,5   | 0,39  | 10                                   |
| 14      | 4,0   | 1,53             | 0,014  | 14,3                                 | 0,55  | 0,38  | 13                                   |
| 15      | 4,5   | 1,56             | 0,012  | 14,6                                 | 0,6   | 0,37  | 16                                   |
| 16      | 5,0   | 1,59             | 0,01   | 14,9                                 | 0,65  | 0,36  | 19                                   |
| 17      | 6,0   | 1,62             | 0,0098 | 15,2                                 | 0,7   | 0,35  | 22                                   |
| 18      | 6,5   | 1,65             | 0,0096 | 15,5                                 | 0,75  | 0,34  | 25                                   |
| 19      | 7,0   | 1,68             | 0,0094 | 15,8                                 | 0,8   | 0,33  | 28                                   |
| 20      | 7,5   | 1,71             | 0,0092 | 16,1                                 | 0,85  | 0,32  | 30                                   |
| 21      | 8,0   | 1,74             | 0,009  | 16,4                                 | 0,9   | 0,31  | 34                                   |
| 22      | 8,0   | 1,77             | 0,0088 | 16,7                                 | 0,95  | 0,3   | 37                                   |
| 23      | 5,2   | 1,62             | 0,0098 | 15,2                                 | 0,7   | 0,35  | 22                                   |
| 24      | 6,3   | 1,65             | 0,0096 | 15,5                                 | 0,75  | 0,34  | 25                                   |
| 25      | 6,5   | 1,68             | 0,0094 | 15,8                                 | 0,8   | 0,33  | 28                                   |

### Задача 6

Водная суспензия частиц твердого вещества разделяется с постоянной скоростью фильтрования на периодически действующем фильтре с поверхностью  $S=0,5 \text{ м}^2$  при температуре  $20^\circ\text{С}$ , (при этой температуре вязкость воды  $\mu = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{сек}$ ). Наибольшая допустимая разность давлений составляет  $\Delta p = 0,2 \text{ МПа}$ . Сопротивление фильтровальной

перегородки  $R_{\phi} = 5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$  можно считать независимым от разности давлений. Отношение объема осадка к объему фильтрата в среднем составляет  $x_0 = 0,025$ .

Диапазон времени одного цикла фильтрования при достижении максимального перепада давления  $\tau_{\phi} = 30 \dots 60 \text{ мин}$ . Выделяемое вещество состоит из сжимаемого осадка, для которого экспериментально найдена зависимость удельного объемного сопротивления от разности давлений в виде  $r_0 = r_{0,p} \cdot (\Delta p)^{s_p}$ , где  $r_{0,p} = 12,5 \cdot 10^{10}$ ,  $s_p = 0,5$ .

Определить скорость фильтрования  $W$ , необходимую производительность насоса, объем собранного фильтрата и толщину слоя образовавшегося осадка. Установить графическую зависимость скорости фильтрования от времени цикла фильтрования.

Таблица 1.6.

| Вариант | Заданная величина                           |                  |        |                                      |       |                            |                                      |
|---------|---|------------------|--------|--------------------------------------|-------|----------------------------|--------------------------------------|
|         | $R_{\phi n} \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-1}$ | $S, \text{ м}^2$ | $x_0$  | $r_0 \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-2}$ | $s_p$ | $\tau_{\phi}, \text{ мин}$ | $\Delta p \cdot 10^{-4}, \text{ Па}$ |
| 0       | 4,5   | 1,8              | 0,016  | 14,0                                 | 0,5   | 35...70                    | 10                                   |
| 1       | 4,0   | 1,53             | 0,014  | 14,3                                 | 0,55  | 40...80                    | 13                                   |
| 2       | 4,5   | 1,56             | 0,012  | 14,6                                 | 0,6   | 45...90                    | 16                                   |
| 3       | 5,0   | 1,59             | 0,01   | 14,9                                 | 0,65  | 50...150                   | 19                                   |
| 4       | 5,5   | 1,62             | 0,0098 | 15,2                                 | 0,7   | 55...165                   | 22                                   |
| 5       | 6,0   | 1,65             | 0,0096 | 15,5                                 | 0,75  | 60...180                   | 25                                   |
| 6       | 6,5   | 1,68             | 0,0094 | 15,8                                 | 0,8   | 65...195                   | 28                                   |
| 7       | 7,0   | 1,71             | 0,0092 | 16,1                                 | 0,85  | 70...210                   | 31                                   |
| 8       | 7,5   | 1,74             | 0,009  | 16,4                                 | 0,9   | 75...225                   | 34                                   |
| 9       | 8,0   | 1,77             | 0,0088 | 16,7                                 | 0,95  | 80...240                   | 37                                   |
| 10      | 7,0   | 1,71             | 0,0092 | 16,1                                 | 0,85  | 70...210                   | 31                                   |
| 11      | 3,5   | 1,8              | 0,016  | 14,0                                 | 0,5   | 35...70                    | 10                                   |
| 12      | 4,0   | 1,53             | 0,014  | 14,3                                 | 0,55  | 40...80                    | 13                                   |
| 13      | 4,5   | 1,56             | 0,012  | 14,6                                 | 0,6   | 45...90                    | 16                                   |
| 14      | 5,0   | 1,59             | 0,01   | 14,9                                 | 0,65  | 50...150                   | 19                                   |
| 15      | 5,5   | 1,62             | 0,0098 | 15,2                                 | 0,7   | 55...165                   | 22                                   |
| 16      | 6,0   | 1,65             | 0,0096 | 15,5                                 | 0,75  | 60...180                   | 25                                   |
| 17      | 6,5   | 1,68             | 0,0094 | 15,8                                 | 0,8   | 65...195                   | 28                                   |



|    |     |      |        |      |      |          |    |
|----|-----|------|--------|------|------|----------|----|
| 18 | 7,0 | 1,71 | 0,0092 | 16,1 | 0,85 | 70...210 | 31 |
| 19 | 7,5 | 1,74 | 0,009  | 16,4 | 0,9  | 75...225 | 34 |
| 20 | 8,0 | 1,77 | 0,0088 | 16,7 | 0,95 | 80...240 | 37 |
| 21 | 7,0 | 1,71 | 0,0092 | 16,1 | 0,85 | 70...210 | 31 |
| 22 | 4,5 | 1,56 | 0,012  | 14,6 | 0,6  | 45...90  | 16 |
| 23 | 5,0 | 1,59 | 0,01   | 14,9 | 0,65 | 50...150 | 19 |
| 24 | 5,5 | 1,62 | 0,0098 | 15,2 | 0,7  | 55...165 | 22 |
| 25 | 6,0 | 1,65 | 0,0096 | 15,5 | 0,75 | 60...180 | 25 |

### Задача 7

Водная суспензия частиц твердого вещества разделяется с постоянной скоростью фильтрования на периодически действующем фильтре с поверхностью  $S=1 \text{ м}^2$  при температуре  $20^\circ\text{С}$ , (при этой температуре вязкость воды  $\mu = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{сек}$ ). Время одного цикла фильтрования до достижения максимального перепада давления  $\tau_\phi = 60 \text{ мин}$ .

Сопротивление фильтровальной перегородки  $R_\phi = 5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$  можно считать независимым от разности давлений. Отношение объема осадка к объему фильтрата в среднем составляет  $x_0 = 0,025$ .

Выделяемое вещество состоит из сжимаемого осадка, для которого экспериментально найдена зависимость удельного объемного сопротивления от разности давлений в виде

$$r_0 = r_{0p} \cdot (\Delta p)^{s_p}, \text{ где } r_{0p} = 12,5 \cdot 10^{10}, s_p = 0,5.$$

Определить скорость фильтрования  $W$ , необходимую производительность насоса, объем собранного фильтрата и толщину слоя образовавшегося осадка при допустимой разности давлений на фильтре в диапазоне  $\Delta p_{\text{max}} = 0,15 \dots 0,4 \text{ МПа}$ . Установить графическую зависимость скорости фильтрования от допустимого перепада давления на фильтре.

Таблица 1.7.

| Вариа<br>нт | Заданная величина                           |                  |       |                                      |       |                          |                                      |
|-------------|---|------------------|-------|--------------------------------------|-------|--------------------------|--------------------------------------|
|             | $R_{\phi n} \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-1}$ | $S, \text{ м}^2$ | $x_0$ | $r_0 \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-2}$ | $s_p$ | $\tau_\phi, \text{ мин}$ | $\Delta p \cdot 10^{-4}, \text{ Па}$ |
| 1           | 3.5   | 1,8              | 0,016 | 14,0                                 | 0,5   | 35                       | 10...15                              |

|    |     |      |        |      |      |    |         |
|----|-----|------|--------|------|------|----|---------|
| 2  | 4,0 | 1,53 | 0,014  | 14,3 | 0,55 | 40 | 13...18 |
| 3  | 4,5 | 1,56 | 0,012  | 14,6 | 0,6  | 45 | 16...21 |
| 4  | 5,0 | 1,59 | 0,01   | 14,9 | 0,65 | 50 | 19...24 |
| 5  | 5,5 | 1,62 | 0,0098 | 15,2 | 0,7  | 55 | 22...27 |
| 6  | 6,0 | 1,65 | 0,0096 | 15,5 | 0,75 | 60 | 25...30 |
| 7  | 6,5 | 1,68 | 0,0094 | 15,8 | 0,8  | 65 | 28...33 |
| 8  | 7,0 | 1,71 | 0,0092 | 16,1 | 0,85 | 70 | 31...36 |
| 9  | 7,5 | 1,74 | 0,009  | 16,4 | 0,9  | 75 | 34...39 |
| 10 | 3,5 | 1,8  | 0,016  | 14,0 | 0,5  | 35 | 10...15 |
| 11 | 4,0 | 1,53 | 0,014  | 14,3 | 0,55 | 40 | 13...18 |
| 12 | 4,5 | 1,56 | 0,012  | 14,6 | 0,6  | 45 | 16...21 |
| 13 | 5,0 | 1,59 | 0,01   | 14,9 | 0,65 | 50 | 19...24 |

Продолжение табл. 1.7

| Вариант | Заданная величина                           |                  |        |                         |       |                            |                                      |
|---------|---|------------------|--------|-------------------------|-------|----------------------------|--------------------------------------|
|         | $R_{\phi n} \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-1}$ | $S, \text{ м}^2$ | $x_0$  | $r_{0p} \cdot 10^{-10}$ | $s_p$ | $\tau_{\phi}, \text{ мин}$ | $\Delta p \cdot 10^{-4}, \text{ Па}$ |
| 14      | 5,5   | 1,62             | 0,0098 | 15,2                    | 0,7   | 55                         | 22...27                              |
| 15      | 6,0   | 1,65             | 0,0096 | 15,5                    | 0,75  | 60                         | 25...30                              |
| 16      | 6,5   | 1,68             | 0,0094 | 15,8                    | 0,8   | 65                         | 28...33                              |
| 17      | 7,0   | 1,71             | 0,0092 | 16,1                    | 0,85  | 70                         | 31...36                              |
| 18      | 7,5   | 1,74             | 0,009  | 16,4                    | 0,9   | 75                         | 34...39                              |
| 19      | 8,0   | 1,77             | 0,0088 | 16,7                    | 0,95  | 80                         | 37...42                              |
| 20      | 3,5   | 1,8              | 0,016  | 14,0                    | 0,5   | 35                         | 10...15                              |
| 21      | 4,0   | 1,53             | 0,014  | 14,3                    | 0,55  | 40                         | 13...18                              |
| 22      | 4,5   | 1,56             | 0,012  | 14,6                    | 0,6   | 45                         | 16...21                              |
| 23      | 5,0   | 1,59             | 0,01   | 14,9                    | 0,65  | 50                         | 19...24                              |
| 24      | 5,5   | 1,62             | 0,0098 | 15,2                    | 0,7   | 55                         | 22...27                              |
| 25      | 6,0   | 1,65             | 0,0096 | 15,5                    | 0,75  | 60                         | 25...30                              |

### Задача 8

Водная суспензия частиц твердого вещества фильтруется на периодически действующем фильтре с поверхностью  $S = 0,5 \text{ м}^2$  при температуре  $20^\circ \text{ С}$ , при этой температуре вязкость воды  $\mu = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{сек}$ . Сопротивление фильтровальной перегородки  $R_{\phi} = 6 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$  и не зависит от разности давлений на ней. Отношение объема осадка к объему фильтрата в

среднем составляет  $x_0 = 0,015$ . В течение каждой операции фильтрования разделяется объем  $V_c = 0,5 \text{ м}^3$  суспензии. Выделяемое вещество состоит из сжимаемого осадка, для которого экспериментально найдена зависимость удельного объемного сопротивления от разности давлений в виде  $r_0 = r_{0p} \cdot (\Delta p)^{s_p}$ , где  $r_{0p} = 8,5 \cdot 10^{10}$ ,  $s_p = 0,5$ . Определить продолжительности одной операции фильтрования для режимов работы при постоянном давлении  $\tau_p$  и при постоянной скорости фильтрации  $\tau_w$  в диапазоне перепада давления на фильтре  $\Delta p = 0,04 \dots 0,12 \text{ МПа}$ . Величина перепада давления в режиме работы при постоянном давлении соответствует максимальному перепаду давления на фильтре в конце цикла при работе с постоянной скоростью  $\Delta p = \Delta p_{\max}$ . Исходные данные для вариантов задания взять из таблицы 1.8.

Таблица 1.8

| Вариант | Заданная величина  |                  |       |                                      |       |                                      |   |
|---------|--------------------|------------------|-------|--------------------------------------|-------|--------------------------------------|---|
|         | $V_c, \text{ м}^3$ | $S, \text{ м}^2$ | $x_0$ | $r_{0p} \cdot 10^{-10}, \text{ м}^2$ | $s_p$ | $\Delta p \cdot 10^{-4}, \text{ Па}$ | $R_{fn} \cdot 10^{-10}, \text{ м}^{-1}$ |
| 0       | 0,55               | 0,8              | 0,16  | 0,4                                  | 0,4   | 3...8                                | 4,1                                     |
| 1       | 0,6                | 0,53             | 0,14  | 0,43                                 | 0,45  | 4...9                                | 4,3                                     |
| 2       | 0,65               | 0,56             | 0,12  | 0,46                                 | 0,5   | 5...10                               | 4,5                                     |
| 3       | 0,7                | 0,59             | 0,1   | 0,49                                 | 0,55  | 6...12                               | 4,7                                     |
| 4       | 0,75               | 0,62             | 0,098 | 0,52                                 | 0,6   | 7...13                               | 4,9                                     |
| 5       | 0,8                | 0,65             | 0,096 | 0,55                                 | 0,65  | 8...14                               | 5,1                                     |
| 6       | 0,85               | 0,68             | 0,094 | 0,58                                 | 0,7   | 9...15                               | 5,3                                     |
| 7       | 0,9                | 0,71             | 0,092 | 0,61                                 | 0,75  | 10...16                              | 5,4                                     |
| 8       | 0,95               | 0,74             | 0,09  | 0,64                                 | 0,8   | 11...17                              | 5,7                                     |
| 9       | 1,0                | 0,77             | 0,088 | 0,67                                 | 0,85  | 12...18                              | 5,9                                     |
| 10      | 0,55               | 0,8              | 0,16  | 0,4                                  | 0,4   | 3...8                                | 4,1                                     |
| 11      | 0,6                | 0,53             | 0,14  | 0,43                                 | 0,45  | 4...9                                | 4,3                                     |
| 12      | 0,65               | 0,56             | 0,12  | 0,46                                 | 0,5   | 5...10                               | 4,5                                     |
| 13      | 0,7                | 0,59             | 0,1   | 0,49                                 | 0,55  | 6...12                               | 4,7                                     |
| 14      | 0,75               | 0,62             | 0,098 | 0,52                                 | 0,6   | 7...13                               | 4,9                                     |
| 15      | 0,8                | 0,65             | 0,096 | 0,55                                 | 0,65  | 8...14                               | 5,1                                     |
| 16      | 0,85               | 0,68             | 0,094 | 0,58                                 | 0,7   | 9...15                               | 5,3                                     |

|    |      |      |       |      |      |         |     |
|----|------|------|-------|------|------|---------|-----|
| 17 | 0,9  | 0,71 | 0,092 | 0,61 | 0,75 | 10...16 | 5,4 |
| 18 | 0,95 | 0,74 | 0,09  | 0,64 | 0,8  | 11...17 | 5,7 |
| 19 | 1,0  | 0,77 | 0,088 | 0,67 | 0,85 | 12...18 | 5,9 |
| 20 | 0,75 | 0,62 | 0,098 | 0,52 | 0,6  | 7...13  | 4,9 |
| 21 | 0,8  | 0,65 | 0,096 | 0,55 | 0,65 | 8...14  | 5,1 |
| 22 | 0,85 | 0,68 | 0,094 | 0,58 | 0,7  | 9...15  | 5,3 |
| 23 | 0,85 | 0,71 | 0,092 | 0,61 | 0,75 | 10...16 | 5,4 |
| 24 | 0,9  | 0,74 | 0,09  | 0,64 | 0,8  | 11...17 | 5,7 |
| 25 | 0,95 | 0,77 | 0,088 | 0,67 | 0,85 | 12...18 | 5,9 |

#### ПРИЛОЖЕНИЕ А

Кинематической вязкости  $\nu$  в зависимости от температуры  $\cdot 10^{-8}, \text{м}^2 / \text{с}$

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\nu$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\nu$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\nu$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\nu$ |
|---------------------|-------|---------------------|-------|---------------------|-------|---------------------|-------|
| 0                   | 179   | 9                   | 135   | 18                  | 106   | 40                  | 66    |
| 1                   | 173   | 10                  | 131   | 19                  | 104   | 45                  | 60    |
| 2                   | 167   | 11                  | 127   | 20                  | 101   | 50                  | 56    |
| 3                   | 162   | 12                  | 124   | 22                  | 99    | 55                  | 51    |
| 4                   | 157   | 13                  | 121   | 24                  | 92    | 60                  | 48    |
| 5                   | 152   | 14                  | 118   | 26                  | 88    | 70                  | 41    |
| 6                   | 147   | 15                  | 115   | 28                  | 84    | 80                  | 37    |
| 7                   | 143   | 16                  | 112   | 30                  | 80    | 90                  | 33    |
| 8                   | 139   | 17                  | 109   | 35                  | 73    | 100                 | 28    |

#### ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Динамической вязкости  $\mu$  в зависимости от температуры

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\mu, \text{н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\mu, \text{н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\mu, \text{н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\mu, \text{н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\mu, \text{н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$ |
|---------------------|---|---------------------|---|---------------------|---|---------------------|---|---------------------|---|
| 0                   | 0,00179                                     | 20                  | 0,00101                                     | 40                  | 0,000656                                    | 60                  | 0,000469                                    | 81                  | 0,000357                                    |
| 1                   | 0,00173                                     | 21                  | 0,00098                                     | 41                  | 0,000644                                    | 61                  | 0,000462                                    | 82                  | 0,000352                                    |
| 2                   | 0,00167                                     | 22                  | 0,00096                                     | 42                  | 0,000632                                    | 62                  | 0,000455                                    | 83                  | 0,000348                                    |
| 3                   | 0,00162                                     | 23                  | 0,00094                                     | 43                  | 0,000621                                    | 63                  | 0,000448                                    | 84                  | 0,000344                                    |
| 4                   | 0,00156                                     | 24                  | 0,00091                                     | 44                  | 0,00061                                     | 64                  | 0,000442                                    | 85                  | 0,00034                                     |
| 5                   | 0,00152                                     | 25                  | 0,000984                                    | 45                  | 0,000599                                    | 65                  | 0,000436                                    | 86                  | 0,000336                                    |
| 6                   | 0,00147                                     | 26                  | 0,000874                                    | 46                  | 0,000588                                    | 66                  | 0,000429                                    | 87                  | 0,000332                                    |
| 7                   | 0,00143                                     | 27                  | 0,000855                                    | 47                  | 0,000578                                    | 67                  | 0,000423                                    | 88                  | 0,000328                                    |
| 8                   | 0,00139                                     | 28                  | 0,000836                                    | 48                  | 0,000568                                    | 68                  | 0,000417                                    | 89                  | 0,000324                                    |
| 9                   | 0,00135                                     | 29                  | 0,000818                                    | 49                  | 0,000559                                    | 69                  | 0,000412                                    | 90                  | 0,00032                                     |
| 10                  | 0,00131                                     | 30                  | 0,000801                                    | 50                  | 0,000549                                    | 70                  | 0,000406                                    | 91                  | 0,000317                                    |
| 11                  | 0,00127                                     | 31                  | 0,000784                                    | 51                  | 0,00054                                     | 71                  | 0,000401                                    | 92                  | 0,000313                                    |
| 12                  | 0,00124                                     | 32                  | 0,000768                                    | 52                  | 0,000532                                    | 72                  | 0,000395                                    | 93                  | 0,00031                                     |

|    |         |    |          |    |          |    |          |     |          |
|----|---------|----|----------|----|----------|----|----------|-----|----------|
| 13 | 0,0012  | 33 | 0,000752 | 53 | 0,000523 | 73 | 0,00039  | 94  | 0,000306 |
| 14 | 0,00117 | 34 | 0,000737 | 54 | 0,000515 | 74 | 0,000385 | 95  | 0,000303 |
| 1  | 0,00114 | 35 | 0,000723 | 55 | 0,000506 | 75 | 0,00038  | 96  | 0,000299 |
| 16 | 0,00111 | 36 | 0,000709 | 56 | 0,000499 | 76 | 0,000375 | 97  | 0,000296 |
| 17 | 0,0010  | 37 | 0,000695 | 57 | 0,000491 | 78 | 0,00037  | 98  | 0,000293 |
| 18 | 0,00106 | 38 | 0,000681 | 58 | 0,000483 | 79 | 0,000366 | 99  | 0,00029  |
| 19 | 0,00103 | 39 | 0,000669 | 59 | 0,000476 | 80 | 0,000361 | 100 | 0,000284 |

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Удельный вес воды зависимости от температуры

| $t, ^\circ C$ | $\gamma, н/м^3$ | $t, ^\circ C$ | $\gamma, н/м^3$ | $t, ^\circ C$ | $\gamma, н/м^3$ |
|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 0             | 9808,7          | 14            | 9803,1          | 40            | 9735            |
| 4             | 9810            | 16            | 9800,2          | 50            | 9694,2          |
| 6             | 9809,7          | 18            | 9796,8          | 60            | 9647            |
| 8             | 9808,9          | 20            | 9792,9          | 70            | 9593,6          |
| 10            | 9807,5          | 25            | 9781,7          | 80            | 9534,6          |
| 12            | 9805,6          | 30            | 9768,4          | 100           | 9404,4          |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Константинов Ю.М. Гидравлика. – К.: Выща шк., 1988. – 398 с.
2. Специальные вопросы гидравлики систем водоснабжения и водоотведения: Методические указания и задания к расчетно-графическим упражнениям и контрольной работе для студентов специальности «Водоснабжение, канализация, рациональное использование и охрана водных ресурсов»/ Авт. – сост. Ю.М. Константинов, А.М. Кравчук, Н.О., Езерский, М.С. Краснитский. – К.: КИСИ, 1991. – 52 с.
3. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. – М.: Химия, 1971. – 440 с.

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В. И. ВЕРНАДСКОГО»**

**АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ**

**ФАКУЛЬТЕТ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭНЕРГЕТИКИ**

**МОДУЛЬ СПЕЦИАЛЬНАЯ ДИСЦИПЛИНА "ВОДОСНАБЖЕНИЕ,  
КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ  
РЕСУРСОВ"**

**Методические указания**

к самостоятельной работе обучающихся

направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства,  
направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны  
водных ресурсов»

Симферополь

2019

Модуль Специальная дисциплина "Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов": Методические указания к практическим занятиям для обучающихся направления подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов». – Симферополь, 2019. – 42 с.

Методические указания предназначены для обучающихся по направлению подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства, направленность «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» при изучении дисциплины «Модуль Специальная дисциплина "Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов"».

Составитель: Николенко И.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и санитарной техники.

Утверждено на заседании учебно-методической комиссии факультета водных ресурсов и энергетики от 24 апреля 2019 года, протокол № 8.

Одобрено на заседании кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники от 17 апреля 2019 года, протокол № 17.

© Николенко И.В., 2019

©ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского», АСиА, 2019

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 4  |
| 1. Общие сведения.....  | 4  |
| 2. Расчет объема загрязнений, содержащихся<br>в сточной воде.....   | 5  |
| 3. Определение предельно допустимых сбросов (ПДС)<br>веществ, поступающих в водные объекты<br>со сточными водами..... | 8  |
| 4. Расчет ущерба, причиняемого сбросом сточных вод.....   | 10 |
| 5. Расчет экономического эффекта от реализации<br>водоохранных мероприятий.....                                       | 14 |
| 6. Оценка рекреационного потенциала водного объекта.....  | 17 |
| 7. Платежи за водопользование.....  | 23 |
| 8. Условия выпуска сточных вод в водоемы.....   | 28 |
| Список литературы.....  | 31 |



## **Введение**

В методических указаниях представлены методы расчетов объемов загрязнений содержащихся в сточной воде; определения ПДС; ущерба, причиняемого сбросом сточных вод; экономического эффекта от реализации водоохранных мероприятий; оценки рекреационного потенциала водного объекта; платежей за водопользование, а также приведены условия выпуска сточных вод в водоемы.

Методические указания составлены в соответствии с программой дисциплины «Комплексное использование водных ресурсов» и предназначены для практических занятий и самостоятельной работы для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство», профиль «Водоснабжение и водоотведение».

### **1. Общие сведения**

Комплексное использование водных ресурсов – использование водных ресурсов для удовлетворения нужд населения и различных отраслей национальной экономики, при котором находят экономически оправданное применение все полезные свойства того или иного водного объекта [1].

Понятие «комплексное использование и охрана водных ресурсов» предусматривает комплекс следующих основных мероприятий:

- всесторонняя оценка природных вод с учетом антропогенной деятельности в современных условиях и на перспективу;
- выявление потребностей в воде всех отраслей народного хозяйства, обоснование норм водопотребления с учетом повторного или последовательного использования воды, определение объема безвозвратных потерь;
- установление мер по охране природных вод от истощения и загрязнения, а также разработку мер и предложений по очистке, обезвреживанию и использованию промышленных, коммунальных и сельскохозяйственных стоков;
- подсчет экономического эффекта от реализации запроектированных мер.

Охрана вод заключается в проведении комплекса правовых, природоохранных, экологических, социальных, организационных и инженерно-технических мероприятий, направленных на предотвращение, ограничение и уменьшение негативного воздействия на водную среду, обеспечение качества воды и устранение последствий загрязнения, засорения и истощения вод.

## 2. Расчет объема загрязнений, содержащихся в сточной воде

Объем загрязнений, содержащихся в сточной воде  $W_i$ , м<sup>3</sup>/сут., может быть определен по формуле [2-5]:

$$W_i = \frac{M_i}{\rho_i}, \quad (2.1)$$

где  $M_i$  – масса  $i$ -ого загрязнения, содержащегося в сточной воде, кг/сут.;

$\rho_i$  – плотность  $i$ -ого загрязнения, определяемая обычно по справочникам, кг/м<sup>3</sup>.

В том случае, если определить плотность  $i$ -го загрязнения по справочнику затруднительно (например, нефтепродукты, плотность которых зависит от их вида), плотность  $i$ -го загрязнения определяется экспериментально при помощи набора аэрометров или пикнометрическим способом.

Масса сбросов загрязняющих веществ подразделяется на следующие категории:

- предельно допустимые сбросы (ПДС);
- временно согласованные сбросы или лимиты, установленные на период достижения ПДС (ВСС);
- превышение нормативных сбросов.

Порядок нормирования сбросов устанавливается в соответствии с «Инструкцией по нормированию выбросов (сбросов) загрязняющих веществ в атмосферу и водные объекты», утвержденной в 1989 г. и «Методикой расчета ПДС веществ в водные объекты со сточными водами», утвержденной в 1991 г.

Фактическая масса годового сброса загрязнений учитывается природопользователем в ежегодной статической отчетности по форме № 2-тп-водхоз, составленных на основании специальных журналов, в которых учитываются результаты работы источников загрязнения водных объектов за год.

Фактическая масса годового сброса загрязнений делится на:

- массу нормативных ПДС, рассчитанных на основе «Проекта ПДС предприятия» и согласованных с территориальными органами Минприроды РФ»;
- массу ВСС (временно согласованных сбросов), разрешенного выброса по отдельным веществам (лимит), установленного территориальными органами Минприроды РФ на период достижения ПДС;
- на сверхлимитную массу.

Исходными данными для определения фактической массы сброса могут служить:

- данные контрольно-измерительной лаборатории водопользователя, органов государственного экологического контроля, иной аккредитованной лаборатории;
- данные о расходе топлива, сырья, материалов;
- данные о временном режиме работы оборудования за год;
- нормативы образования веществ, применяемые при проектировании очистных сооружений, в том числе расчетные удельные характеристики загрязнителей на единицу продукции;
- нормативы и характеристики выноса веществ с мелиорируемых объектов, селитебных и иных территорий.

При определении ежеквартальной фактической массы сброса можно использовать следующие варианты:

1) природопользователи сами определяют фактический сброс за квартал на основе результатов анализов, регистрируемых в журналах учета;

2) сброс за квартал определяется по нормативам ПДС или лимиту, а по итогам года определяется вся фактическая масса сброса по данным статотчетности и происходит уточнение массы сбросов на уровне нормативов ПДС или лимитов и повышающих эти нормативы;

3) природопользователи, не имеющие нормативов ПДС или лимитов, определяют ежеквартальную массу сбросов делением годовой массы прошлого года на 4, а по итогам года уточняется фактическая масса выбросов.

Для производителей, имеющих сезонный характер работы, возможно считать отчетным периодом этот сезон.

Порядок контроля за достоверностью данных о сбросах загрязнений определяется системой нормативно-методической документации, утверждаемой Минприродой РФ. В случае отсутствия метода определения вещества в СВ масса этого вещества рассчитывается по данным материального баланса веществ на объекте. Если сточные воды подвергаются очистке, расчет массы вещества, поступающей в водный объект, должен учитывать возможность и степень их удаления в процессе этой очистки.

Масса загрязнений, сброшенных в период аварий и не удаленных в результате осуществления мер по ликвидации ее последствий, включенная в государственную отчетность по форме № 2-тп-водхоз, не учитывается при расчете оплаты по итогам года.

Расчет массы загрязнений  $M_i$ , кг/сут., осуществляется по формуле:

$$M_i = C_i Q_i / 10^3, \quad (2.2)$$

где  $C_i$  – концентрация  $i$ -ого загрязнения, содержащегося в сточных водах;

$Q_i$  – расход сточных вод, м<sup>3</sup>/сут.

Расход сточных вод принимается в соответствии с балансовой схемой рационального использования водных ресурсов промпредприятия.

Расход сточных вод промпредприятия  $Q_{н.п.}$  определяется по формуле:

$$Q_{н.п.} = Q_{техн.} + Q_{х.б.} + Q_{душ.}, \quad (2.3)$$

где  $Q_{техн.}$  – расход сточных вод, образующихся в процессе функционирования технологического оборудования, м<sup>3</sup>/ч;

$Q_{х.б.}$  – расход хозяйственно-бытовых сточных вод, м<sup>3</sup>/ч;

$Q_{душ.}$  – расход сточных вод, образующихся после приема работающих душа.

Расход стоков, образующихся в процессе функционирования технологического оборудования  $Q_{техн.}$ , м<sup>3</sup>/сут, определяется либо на основе анализа паспортов данного технологического оборудования, либо по формуле:

$$Q_{техн.} = N_{техн.} \cdot q_{техн.} / 1000, \quad (2.4)$$

где  $N_{техн.}$  – количество единиц продукции, выпускаемой на данном оборудовании за сутки;

$q_{техн.}$  – удельный расход воды на единицу выпускаемой продукции, л/сут.

Расход хозяйственно-бытовых стоков  $Q_{х.б.}$  определяется по формуле:

$$Q_{х.б.} = \frac{q_{х.ц.} \cdot N_{х.ц.} + q_{г.ц.} \cdot N_{г.ц.}}{8 \cdot 1000}, \quad (2.5)$$

где  $q_{х.ц.} = 25$  л/см – норма водопотребления в холодных цехах на 1 чел.;

$q_{г.ц.} = 45$  л/см – норма водопотребления в горячих цехах на 1 чел.;

$N_{х.ц.}$  и  $N_{г.ц.}$  – число работающих в холодных и горячих цехах, соответственно.

Расход душевых стоков  $Q_{душ.}$ , м<sup>3</sup>/ч определяется по формуле:

$$Q_{душ.} = 0,375 N_{душ.}, \quad (2.6)$$

где  $N_{душ.}$  – число душевых сеток.

### 3. Определение предельно допустимых сбросов (ПДС) веществ, поступающих в водные объекты со сточными водами

Вредные и ядовитые вещества, входящие в показатели качества сточной воды, весьма разнообразны по своему составу. Они нормируются по принципу лимитирующего показателя вредности (ЛПВ), под которым понимается наиболее вероятное неблагоприятное воздействие каждого вещества.

По ЛПВ все вещества в водоемах разделены на 3 группы: содержащие санитарно-токсикологический ЛПВ, общесанитарный ЛПВ и органолептический ЛПВ.

Санитарное состояние водоема при сбросе в него со сточными водами вредных и ядовитых веществ считается удовлетворительным, если соблюдаются два основных условия:

– предельно допустимая концентрация каждого вещества входящего в определенный лимитирующий показатель вредности, уменьшена во столько раз, сколько единиц вредных веществ присутствует в сточных водах и водоеме;

– сумма концентраций всех веществ, выраженных в процентах от соответствующих предельно-допустимых концентраций для каждого вещества в отдельности, не превышает 100% [6]:

$$\sum_1^i \frac{C_{cm}^i}{C_{ПДК}^i} \leq 1, \quad (3.1)$$

где  $C_{cm}^i$  – расчетная концентрация  $i$ -ого вредного вещества в водоеме;

$C_{ПДК}^i$  – ПДК соответствующего вещества;

$i$  – число вредных веществ с одинаковым ЛПВ.

Из этого выражения следует, что каждое вещество (в условиях одновременного присутствия с другими вредными веществами из одной группы ЛПВ) в водоеме должно иметь концентрацию [6]:

$$C_{cm} \leq C_{ПДК}^i \left( 1 - \sum_1^{i-1} \frac{C_{cm}}{C_{ПДК}^i} \right). \quad (3.2)$$

Концентрация каждого из растворенных вредных веществ ( $C_o^i$ ) в очищенных стоках должно быть не более [1]:

$$C_o^i \leq n(C_{cm}^i - C_B^i) + C_B^i, \quad (3.3)$$

где  $C_B^i$  – концентрация  $i$ -го вещества в водоеме;

$n$  – степень разбавления;

$C_{ст}^i$  – концентрация  $i$ -го вещества в сточных водах, поступающих на очистку.

ПДК различных веществ, содержащихся в воде поверхностных источников, определяется рядом законодательных актов РТ и РФ. К ним относятся:

- «Правила охраны поверхностных вод от загрязнений сточными водами»;
- «Правила санитарной охраны прибрежных вод морей»;
- «Основы водного законодательства РФ»;
- Закон РТ «Об охране водных ресурсов»;
- «Правила приема сточных вод в канализацию»;
- «Перечень веществ вредных для здоровья или продуктивности биоресурсов поверхностных источников, сброс поверхностных источников, сброс которых запрещается».

При выпуске сточных вод в поверхностные источники содержание загрязняющих веществ в воде этих источников не должно превышать ПДК в расчетном створе. Исходя из качественных и количественных показателей городских стоков, анализа работы городских очистных сооружений, а также с учетом ПДК загрязнений для каждого предприятия и организаций «Водоканалом» (лабораторией качества воды) определяются предельно-допустимые концентрации загрязнений в сточных водах, сбрасываемых данными предприятиями в городскую канализацию. Состав и количество загрязнений в сточных водах предприятий зависит от технологии принятой, на данном производстве.

Концентрация загрязнений данного вида в сточной воде, сбрасываемой в городскую канализацию с разрешения «Водоканала» определяется по формуле [7]:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i + C_{нас} Q_{нас}}{Q_{общ}}, \quad (3.4)$$

где  $C_i$  – концентрация данного загрязнения в сточной воде  $i$ -го предприятия;

$Q_i$  – расход сточных вод  $i$ -го предприятия;

$C_{нас}$  – концентрация данного загрязнения в сточной воде, поступающей от населения, проживающего в данном населенном пункте;

$Q_{общ}$  – расход сточных вод по населенному пункту.

Предельно-допустимый сброс загрязняющих веществ, поступающих со сточными водами  $Cб_{ПДК}$ , г/ч, определяется по формуле [7]:

$$Cб_{ПДК} = C_i \cdot Q_i, \quad (3.5)$$

где  $C_i$  – концентрация  $i$ -го загрязнения в сточной воде, г/м<sup>3</sup>;

$Q_i$  – расход сточных вод, содержащих  $i$ -ое загрязнение, м<sup>3</sup>/ч.

Поскольку сброс является предельно-допустимым, то и концентрация  $i$ -го загрязнения должна быть таковой, т.е. соответствовать ПДК разрешенной «Водоканалом» к сбросу в канализацию населенного пункта.

Масса загрязнений, сбрасываемых вместе со сточными водами  $M_{ПДС}$ , т/год, определяется по формуле:

$$M_{ПДС} = Cб_{ПДК} \cdot \tau, \quad (3.6)$$

где  $\tau$  – время работы технологического оборудования, работа которого обуславливает появление  $i$ -го загрязнения в сточной воде, ч/год.

#### 4. Расчет ущерба, причиняемого сбросом сточных вод

Для оценки ущерба, причиняемого сбросом сточных вод, разработана «Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды» [5; 8].

К природоохранным мероприятиям относятся все виды хозяйственной деятельности, направленные на снижение и ликвидацию отрицательного антропогенного воздействия на окружающую природную среду, сохранение, улучшение и рациональное использование водного потенциала страны: строительство и эксплуатация очистных сооружений, размещение предприятий и систем транспортных потоков с учетом экологических требований, развития малоотходных и безотходных технологических процессов и т.п. [2; 6].

Под загрязнением окружающей среды понимается антропогенно обусловленные поступления веществ в окружающую среду, приводящие к ухудшению ее состояния с точки зрения социально-экономических интересов общества. Для населения это ухудшение означает потерю его работоспособности в результате заболеваний, для рыбохозяйственных угодий потерю их продуктивности, снижение численности рыбных стад, увеличение заболеваемости водных животных и растений, для

водохозяйственных объектов снижение показателей чистоты и увеличение затрат на получение воды определенного качества.

Загрязнение окружающей среды приводит к возникновению двух видов затрат в народном хозяйстве:

- затраты на предупреждение воздействия загрязненной среды на реципиентов;

- затраты, вызываемые на них загрязненной средой.

Вторые возникают, если полное предупреждение такого воздействия невозможно или если затраты на полное предупреждение оказываются большими, чем сумма затрат обоих типов при частичном предотвращении воздействия загрязненной среды.

Обычно оба указанных типа затрат имеют место одновременно.

Сумма этих затрат называется экономическим ущербом, причиняемым народному хозяйству загрязнением окружающей среды.

Затраты на предупреждение воздействия загрязненной среды на реципиентов при загрязнении водоемов определяются величиной расходов, необходимых для предупреждения использования загрязненной воды на технологические и коммунальные нужды.

К этим расходам относятся:

- затраты на разбавление стоков;
- затраты на перенос водозабора или перемещение потребителей к более чистому источнику;

- затраты на оборудование новых источников;

- затраты на применение более сложных нежели в отсутствие загрязнений, технологий водоподготовки.

Затраты, вызываемые воздействием загрязненной среды на реципиентов возникают у тех водопользователей, которые используют загрязненную воду. Величина этих затрат определяется расходами на компенсацию негативных последствий воздействия загрязнений на людей и различные объекты.

Указанные затраты представляют собой сумму приведенных затрат:

- на медицинское обслуживание людей;
- на компенсацию потерь чистой продукции из-за снижения производительности труда, а также невыходов трудящихся на работу вследствие воздействия загрязнений окружающей среды на население;

- на дополнительные услуги коммунально-бытового хозяйства из-за загрязнения среды;

- на компенсацию количественных и качественных потерь продукции в связи со снижением продуктивности водных ресурсов при их загрязнении;

- на компенсацию потерь промышленной продукции из-за воздействия загрязнений на основные фонды.



В составе затрат, вызываемых воздействием загрязнений среды, учитываются и затраты, вызываемые вторичным загрязнением.

Экономический ущерб от загрязнений среды является комплексной величиной и складывается из ущербов наносимых отдельным видом реципиентов.

К реципиентам относятся:

- население;
- объекты жилищно-коммунального хозяйства;
- сельхозугодия, животные и растения;
- лесные ресурсы;
- рыбные ресурсы;
- лечебно-курортные ресурсы;
- основные фонды промышленности и транспорта.

Ущерб от сброса загрязняющих примесей в  $K$ -й водохозяйственный участок некоторым источником  $Y$ , руб./год, определяется по формуле [2; 6]:

$$Y = \gamma \sigma_K M, \quad (4.1)$$

где  $\gamma$  – стоимостной множитель, определяющий условную величину сброса единицы загрязнений, руб./усл.т (в 1982 г. – 400 руб./т; в 1995 г. – 2000 руб./т);

$\sigma_K$  – константа, характеризующая состояние водотока (табл. 4.1) [5];

$M$  – приведенная масса годового сброса примесей данным источником в  $K$ -й водохозяйственный участок, усл.т/год.

Приведенная масса годового сброса примесей  $M$  определяется по формуле:

$$M = \sum_{i=1}^N A_i m_i, \quad (4.2)$$

где  $i$  – номер сбрасываемой примеси;

$N$  – общее число примесей, сбрасываемых оцениваемым источником;

$A_i$  – показатель опасности сброса  $i$ -го вещества в водоем, усл.т/т (табл. 4.2);

$m_i$  – общая масса годового сброса  $i$ -й примеси оцениваемым источником, т/год.

Показатель опасности сброса  $i$ -го вещества в водоем  $A_i$ , усл.т/год, определяется по формуле:

$$A_i = \frac{1}{\text{ПДК}_{P/X_i}}, \quad (4.3)$$

где  $ПДК_{P/X_i}$  – предельно допустимая концентрация  $i$ -го вещества в водных объектах, г/м<sup>3</sup> (табл. 4.2).

Общая масса годового сброса  $m_i$ , если сброс сточных вод осуществляется без очистки, определяется по формуле:

$$m_i = C_i Q_i, \quad (4.4)$$

где  $C_i$  – величина концентрации  $i$ -ой примеси г/м<sup>3</sup>;

$Q_i$  – объем годового сброса сточных вод с  $i$ -ой примесью, м<sup>3</sup>/год.

Если в водоем сбрасывается сточная вода, прошедшая очистку, то  $m_i$  определяется по формуле:

$$m_i = \frac{100 - P_i}{100} m_i^o, \quad (4.5)$$

где  $P_i$  - количество загрязнений, удерживаемых очистными сооружениями, %;

$m_i^o$  – количество загрязнений, поступающих на очистные сооружения, т/год.

Таблица 4.1

Значения константы  $\sigma_K$  для крупнейших рек РФ

| Реки                       | Участок реки или бассейна | $\sigma_K$ , отн.ед. |
|----------------------------|---------------------------|----------------------|
| Печера                     | Устье                     | 0,16                 |
| Северная Двина             | - // -                    | 0,22                 |
| Нева                       | - // -                    | 0,47                 |
| Дон                        | - // -                    | 1,63                 |
| Волга                      | Цимлянский гидроузел      | 1,13                 |
|                            | Устье р.Оки               | 2,60                 |
|                            | район Кубышева            | 0,80                 |
| Кубань                     | Устье                     | 2,60                 |
| Терек                      | - // -                    | 2,37                 |
| Урал                       | район Уральска            | 2,70                 |
| Обь                        | район Новосибирска        | 0,34                 |
| Иртыш                      | район г.Павлодара         | 2,10                 |
| Енисей                     | район Красноярска, устье  | 0,19                 |
| Лена                       | район Якутска             | 0,15                 |
| Амур                       | Устье                     | 0,19                 |
| Реки Кольского полуострова | - // -                    | 0,95                 |

Таблица 4.2

Значения константы  $A_i$  для некоторых распространенных веществ, загрязняющих водоемы

| Вещество              | ПДК, г/м  |  | Константа $A_i$ , усл.т/т |
|-----------------------|---|--|---------------------------|
|                       | для ведения рыбного хозяйства, ПДК <sub>Р/Х</sub> | для хозяйственно-питьевого водоснабжения, ПДК <sub>Х-П</sub> |                           |
| БПК                   | 3,00  | -  | 0,330                     |
| Взвешенные вещества   | 2,00  | -  | 0,050                     |
| Сульфаты              | -   | 500  | 0,002                     |
| Хлориды               | -   | 350  | 0,003                     |
| Азот общий            | -   | 10   | 0,100                     |
| СПАВ                  | 0,50  | -  | 2,000                     |
| Нефть и нефтепродукты | 0,05  | -  | 20,000                    |
| Медь                  | 0,01  | -  | 100,000                   |
| Цинк                  | 0,01  | -  | 100,000                   |
| Аммиак                | 0,05  | -  | 20,000                    |
| Мышьяк                | 0,05  | -  | 20,000                    |
| Цианиды               | 0,05  | -  | 20,000                    |
| Стирол                | 0,10  | -  | 10,000                    |
| Формальдегиды         | 0,10  | -  | 10,000                    |

### 5. Расчет экономического эффекта от реализации водоохранных мероприятий

Экономическое обоснование природоохранных мероприятий осуществляется путем сопоставления их экономических результатов с необходимыми для их осуществления затратами с помощью показателей общей и сравнительной эффективности природоохранных затрат и чистого экономического эффекта этих мероприятий.

Экономическим результатом природоохранных мероприятий при расчете экономического эффекта природоохранных мероприятий именуется сумма следующих величин:

а) предотвращенного экономического ущерба от загрязнения среды, т.е. не произведенных благодаря уменьшению загрязнений окружающей среды, затрат в материальном производстве и расходов населения;

б) прироста экономической (денежной) оценки природных ресурсов, сберегаемых в результате реализации природоохранного мероприятия;

в) прироста денежной оценки реализуемой продукции, получаемого благодаря полной утилизации сырьевых, топливно-энергетических и других ресурсов в результате осуществления природоохранного мероприятия.

Показатель общей экономической эффективности исчисляется как отношение годового объема полного экономического эффекта к вызвавшим их затратам.

Показатель сравнительной экономической эффективности определяется величиной минимально необходимых совокупных эксплуатационных расходов и капиталовложений в реализацию природоохранных мероприятий, приведенных к годовой размерности с учетом фактора времени.

Чистый экономический эффект определяется как разность между приведенными с учетом времени к одинаковой размерности экономическими результатами природоохранных мероприятий и затратами на их осуществление.

Все эти показатели рассчитываются для сравнительной оценки природоохранных мероприятий при обосновании проектного решения.

Экономическая эффективность средозащитных мероприятий определяется путем установления общей и сравнительной экономической эффективности средозащитных затрат и чистого экономического эффекта средозащитных мероприятий.

Общая экономическая эффективность средозащитных затрат устанавливается путем отнесения полного экономического эффекта средозащитных мероприятий к вызвавшим их средозащитным затратам. Полный экономический эффект средозащитных затрат рассчитывается по разности показателей чистой продукции или прибыли в материальном производстве, затрат в непромышленной сфере, расходов из бюджета и личных средств населения при сложившемся состоянии окружающей среды и при проектируемом ее состоянии.

Полученные в результате расчетов показатели общей эффективности средозащитных затрат сравниваются с нормативными, приводимыми в отраслевых инструкциях, и фактически достигнутыми показателями за предшествующий период по аналогичным мероприятиям. Планируемые показатели общей экономической эффективности средозащитных затрат должны быть, как правило, не ниже значений соответствующих нормативов или отчетных показателей за предшествующий период.

Показатель сравнительной экономической эффективности средозащитных затрат определяется для выбора варианта средозащитных

мероприятий, обеспечивающего достижение требуемого уровня чистоты окружающей среды с минимальными затратами.

Показатель чистого экономического эффекта средозащитных мероприятий является критерием выбора вариантов в тех случаях, когда расчет сравнительной экономической эффективности неприменим из-за несопоставимости сравниваемых вариантов по своему воздействию на окружающую среду и по параметрам реципиентов, на которые распространяется действие средозащитных мероприятий.

Чистый экономический эффект определяется путем сопоставления суммы двух слагаемых: затрат, которые экономятся благодаря ликвидации загрязнения окружающей среды, со средозащитными затратами.

К капитальным вложениям средозащитного назначения относятся затраты на:

- а) создание новых или реконструкцию существующих основных фондов, предотвращающих загрязнение среды;
- б) модификацию технологий, что позволяет снизить их неблагоприятное воздействие на среду;
- в) модификацию технологии в части, обеспечивающей достижение средозащитных целей.

К эксплуатационным расходам относятся:

- а) текущие затраты на содержание основных фондов средозащитного назначения;
- б) текущие затраты на мероприятия, способствующие улучшению качественных характеристик элементов окружающей среды;
- в) затраты на оплату услуг, связанных с охраной окружающей среды;
- г) дополнительные затраты на эксплуатацию основных фондов, позволяющие усовершенствовать технологию для предотвращения ее негативного воздействия на окружающую среду.

Различают фактический (от осуществленных мероприятий) и ожидаемый (планируемый) чистый экономический эффект [6;7].

Чистый годовой экономический эффект  $\mathcal{E}$ , руб./год, определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = P - Z, \quad (5.1)$$

где  $P$  – экономический результат, руб./год;

$Z$  – приведенные затраты на природоохранные мероприятия, руб/год.

Приведенные затраты  $Z$  на природоохранные мероприятия определяются по формуле:

$$Z = C + E_H K, \quad (5.2)$$

где  $C$  – годовые эксплуатационные расходы;

$K$  – капитальные вложения в мероприятия;

$E_H$  – нормативный коэффициент экономической эффективности.

Нормативный коэффициент экономической эффективности  $E_H$  определяется по формуле:

$$E_H = 1/T_H, \quad (5.3)$$

где  $T_H$  – нормативный срок окупаемости, год.

Так как  $T_H = 8$  годам, то  $E_H = 0.12$ .

Экономический результат средозащитных мероприятий  $P$ , руб./год определяется по формуле:

$$P = \Pi + \Delta D, \quad (5.4)$$

где  $\Pi$  – предотвращаемый ущерб от загрязнения среды;

$\Delta D$  – годовой прирост дохода от улучшения производственных результатов деятельности предприятия.

Величина предотвращаемого ущерба  $\Pi$  определяется по формуле:

$$\Pi = Y_1 - Y_2, \quad (5.5)$$

где  $Y_1$  – ущерб, который имел место до осуществления мероприятия;

$Y_2$  – остаточный ущерб после проведения мероприятия.

Годовой прирост дохода от улучшения производственных результатов при приведении многоцелевого средозащитного мероприятия  $\Delta D$  определяется по формуле:

$$\Delta D = \sum_{j=1}^n q_j C_j - \sum_{i=1}^m q_i C_i, \quad (5.6)$$

где  $q_j$  – количество товарной продукции  $j$ -го вида, выпускаемой после осуществления средозащитного мероприятия;

$q_i$  – тоже до осуществления мероприятия;

$C_j$  и  $C_i$  – соответственно, стоимость единицы  $j$ -ой и  $i$ -ой продукции.

## 6. Оценка рекреационного потенциала водного объекта

Водные объекты делятся на естественные (реки, озера, моря) и искусственные (водохранилища). Загрязнение водоемов происходит естественным и искусственным образом. В первом случае загрязнения образуются за счет отмирания обитателей водоемов животного и растительного мира, а также за счет загрязнений, поступающих в водоемы с дождевыми и талыми водами. Во втором случае загрязнения поступают со сточными водами. В загрязненных водоемах имеются следующие характерные признаки [6]:

- появление плавающих веществ на поверхности воды и отложение на дне осадка;
- изменение физических свойств воды: прозрачности и цветности, появления запахов и привкусов;
- изменение химического состава воды (реакций, количества органических и минеральных примесей, появление ядовитых веществ и т.п.);
- уменьшение количества растворенного в воде кислорода, расходуемого на окисление поступающих органических загрязнений;
- изменение видов и количества бактерий и появление болезнетворных бактерий за счет поступления их вместе со сточными водами.

Процесс естественного загрязнения водоемов человеку подконтролен лишь косвенно. Так сброс некоторых органических (аммиак) и неорганических веществ (соли тяжелых и радиоактивных металлов) способен инициировать гибель представителей водной флоры и фауны, что в свою очередь ведет к усилению естественного загрязнения водоема. Сброс дождевых и талых стоков в водные объекты человек может предотвратить вообще, либо регулируя расход этих стоков. Так сброс в водные объекты ливневых стоков населенных пунктов допускается, если расход воды в водоеме составляет не менее 0.016 л/с на одного жителя населенного пункта, с территории которого сбрасываются сточные воды. Наибольшую опасность в плане загрязнения водных объектов представляет процесс искусственного загрязнения водоемов, сброс в них хозяйственно-бытовых, производственных, а иногда и поверхностных сточных вод.

Вместе с тем сброс сточных вод в водоемы, а значит и функционирование коммунального хозяйства больших городов, были бы невозможны, если бы не осуществлялось естественное самоочищение водных объектов. Количество загрязнений, вносимых в водоем вместе со спускаемыми сточными водами в результате сложных физических, химических и биологических превращений, происходящих в водоеме, постепенно уменьшается. Органические, а также некоторые виды химических веществ окисляются (минерализуются), стабилизируются, кислоты и щелочи нейтрализуются с образованием труднорастворимых солей, радиоактивные вещества распадаются и т.п.

Уменьшение концентрации всех загрязнений, поступающих в водоем со стоками, происходит вследствие их разбавления водой водоема. В результате этого концентрация загрязнений снижается, а иногда происходит их полное исчезновение. Таким образом, водоем можно рассматривать как естественное очистное сооружение. Только в тех случаях, когда водоем не может обезвредить поступающие в него

загрязнения, необходимо произвести очистку стоков до выпуска в водоем. Значит для того, чтобы определить степень очистки сточных вод, необходимо верно оценить рекреационную способность водоема. Это позволяет сохранить чистоту водоема при минимальных затратах на строительство очистных сооружений.

Для оценки рекреационных способностей водоема необходимо провести гидрогеологические, гидробиологические и физико-химические исследования.

Ориентировочно оценкой степени чистоты рек могут служить величины БПК<sub>5</sub> речной воды:

- чистые реки – 2 мг/л;
- достаточно чистые – 3 мг/л;
- сомнительные – 5 мг/л;
- очень грязные – 10 мг/л.

Кратность разбавления сточной воды  $n$  в расчетных створах реки определяется по формуле:

$$n = \frac{aQ_{рек} + Q_{ст.в.}}{Q_{ст.в.}}, \quad (6.1)$$

где  $a$  – коэффициент смешения;

$Q_{рек}$  – расход сточной воды при 95% обеспеченности;

$Q_{ст.в.}$  – расход сточных вод.

Коэффициент смешения  $a$  для реки определяется по формуле:

$$a = \frac{1 - e^{-\alpha\sqrt[3]{L}}}{1 - \frac{Q_{рек}}{Q_{ст.в.}} e^{-\alpha\sqrt[3]{L}}}, \quad (6.2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент;

$L$  – расстояние от места выпуска стоков до расчетного створа по фарватеру.

Коэффициент  $\alpha$  определяется по формуле:

$$\alpha = \varphi \xi \sqrt[3]{\frac{E}{Q_{ст.в.}}}, \quad (6.3)$$

где  $\varphi = \frac{L}{L_{пр}}$  – коэффициент извилистости русла;

$L_{пр}$  – расстояние от места выпуска до расчетного створа по прямой;



$\xi$  – коэффициент, зависящий от места расположения выпуска (у берега  $\xi = 1$ , на фарватере  $\xi = 1,5$ );

Коэффициент турбулентной диффузии  $E$ :

$$E = \frac{V_{cp} H_{cp}}{200}, \quad (6.4)$$

где  $V_{cp}$  – средняя скорость воды в реке;

$H_{cp}$  – средняя глубина реки.

Коэффициент разбавления  $n$  для замкнутого водохранилища:

$$n = A(5.56 L_{np} / d_o)^{PS}, \quad (6.5)$$

где  $A$  – параметр, определяющий изменение разбавления.

$d_o$  – диаметр выпускного отверстия;

$P$  – параметр, зависящий от степени проточности водоема;

$S$  – параметр, зависящий от глубины водоема.

При сосредоточенном выпуске  $A = 1$ .

При рассеивающем выпуске:

$$A = 0,74 (L_{np}/b + 2,1) - 0,4, \quad (6.6)$$

где  $b$  – расстояние между оголовками выпуска.

Параметр  $P$  зависящий от степени проточности водоема, если движение воды в водном объекте определяется течением стоков:

$$P = \frac{L_{np} \cdot F_{сум}}{1,5 \cdot 10^{-5} \beta_S + W_{ст} + L_{np} F_{сум}}, \quad (6.7)$$

где  $W_{ст}$  – годовой объем стоков;

$F_{сум}$  – суммарная площадь отверстий выпуска;

$\beta_S$  – период обмена воды в водоеме.

Период обмена воды в водоеме  $\beta_S$ , год определяется по формуле:

$$\beta_S = \frac{W_B}{M}, \quad (6.8)$$

где  $W_B$  – полная емкость водоема;

$M$  – средний объем годового стока.

$$\text{Если } V_B / V_0 \leq 0,001, \quad \text{то } P = \frac{V_B / V_0}{1,5 \cdot 10^{-5} + V_B / V_0}, \quad (6.9)$$

Если  $V_B / V_0 > 0,001$ , то  $P = 1$ ,

где  $V_B$  – скорость потока;

$V_0$  – скорость истечения сточной воды.

Параметр  $S$  зависящий от глубины водоема определяется по формуле:

$$S = 0,875 + 0,001 \frac{H_{cp}}{d_0} . \quad (6.10)$$

Для того чтобы сточные воды, сбрасываемые в водные объекты, не нарушили рекреационную способность водоема, концентрация загрязнений в них не должна превышать:

$$C_{ст} \leq \frac{\alpha Q_{рек}}{Q_{ст.в.}} (C_{пр.д.} - C_p) + C_{пр.д.}, \quad (6.11)$$

где  $C_{пр.д.}$  – ПДК загрязнений;

$C_p$  – содержание загрязнений в речной воде.

Все водоемы РФ разделены на водоемы, используемые на хозяйственно-питьевые нужды, и водоемы, используемые для рыбохозяйственных целей. Водоемы первой группы делятся на две категории:

I категория – водоемы для хозяйственно-питьевого водоснабжения;

II категория – водоемы для спорта, купания и отдыха населения.

Вторая группа водоемов также делится на две категории:

I категория – водоемы обеспечивающие сохранение и воспроизводство ценных пород рыб, II категория – все остальные водоемы. Для каждой группы водоемов и каждой их категории определено ПДК загрязнений.

Уточнением группы водоема и его категории осуществляется органами санэпиднадзора и рыбохозяйственных организаций.

Нормативы качества воды в водоемах относятся к створам, расположенным на проточных водоемах на 1 км выше ближайшего по течению пункта водопользования, а на непроточных водоемах – к створам на 1 км от пункта водопользования.

Концентрация взвеси в речной воде после спуска сточных вод не должно увеличиваться более чем на 0,25 мг/л и 0,75 мг/л для водоемов, соответственно, I и II категории.

Сточные воды, содержащие взвешенные вещества со скоростью осаждения менее 0,4 мм/с для проточных водоемов и 0,2 мм/с для непроточных, сбрасывать запрещается, так как в водоеме образуется

осадок, минерализация которого резко ухудшает рекреационную способность водоема.

Наличие на поверхности плавающих веществ и пятен масел не допускается.

В воде водоема содержание кислорода должно быть не менее 4 мг/л для водоемов хозяйственно-культурного назначения и 6 мг/л для водоемов рыбохозяйственного назначения.

БПК<sub>полн</sub> при  $t = +20^{\circ}\text{C}$  речной воды не должна превышать 3 мг/л для водоемов I категории и 6 мг/л для водоемов II категории, рН речной воды должно находиться в пределах 6,5–8,5.

Окраска речной воды не должна обнаруживаться в столбике воды 20 см для водоемов I категории и 10 см для водоемов II категории.

Для того, чтобы рекреационные способности водоема не нарушились после сброса в него стоков, температура речной воды не должна повышаться более, чем на  $3^{\circ}\text{C}$  по сравнению с температурой самого жаркого месяца года за последние 10 лет.

Сухой остаток речной воды не должен превышать 1000 мг/л, в том числе до 300 мг/л сульфатов и 100 мг/л хлоридов.

Сточные воды, сбрасываемые в водоем, содержат большое число бактерий. Кроме того, биохимическое окисление органики в реке тоже способствует развитию большого числа бактерий. В процессе минерализации органики условия для жизни бактерий ухудшаются, и начинается их отмирание. Микрофауна водоемов (инфузории, коловратки, бактериофаг) поедает бактерии. Влияет на жизнедеятельность бактерий физико-химические процессы, происходящие в реке (ее температура, рН, наличие некоторых химических веществ), т.е. происходит бактериальное самоочищение водоемов. О бактериальном состоянии водоема судят по коли-индексу – числу палочек коли в единицу объема воды. При остаточном хлоре 1,5 мг/л коли-индекс речной воды не должен превышать 1000.

Допустимое содержание взвеси в сточной воде  $m$ , позволяющее не нарушать рекреационный потенциал водоема после сброса в него стоков, составляет:

$$m = P \left( \frac{aQ_{рек}}{Q_{ст.в.}} + 1 \right) + v, \quad (6.12)$$

где  $v$  – содержание взвеси в речной воде;

$P$  – допустимое увеличение содержания взвеси.

БПК<sub>полн</sub> сточной воды, обеспечивающая после ее сброса в водоем приемлемый кислородный режим  $L_{ст}$ , составляет:

$$L_{cm} = \frac{aQ_{рек}}{0,4Q_{cm.в.}} (Q_p - 0,4L_p - 4) - 10, \quad (6.13)$$

где  $Q_p$  – содержание кислорода в речной воде;

$L_p$  – БПК<sub>полн</sub> речной воды.

Температура сточной воды, сбрасываемой в водоем  $T_{cm.в.}$ , составляет:

$$T_{cm.в.} = 3 \left( \frac{aQ_{рек}}{Q_{cm.в.}} + 1 \right) + T_p, \quad (6.14)$$

где  $T_p$  – температура реки.

БПК<sub>полн</sub> сточной воды, сбрасываемой в водоем, обеспечивающее процесс его биохимического самоочищения  $L_{сб}$ , определяется по формуле:

$$L_{сб} = \frac{aQ_{рек}}{Q_{cm.в.} \cdot 10^{-K_{cm}\tau}} \left( L_{n.д.} - L_p \cdot 10^{-K_p\tau} \right) + \frac{L_{n.д.}}{10^{-K_{cm}\tau}}, \quad (6.15)$$

где  $\tau = \frac{L}{V_{ср}}$  – продолжительность перемешивания воды от выпуска до

расчетного створа по фарватеру;

$L_{n.д.}$  – предельно допустимая БПК<sub>полн</sub> речной воды в расчетном створе;

$K_{cm}$ ,  $K_p$  – константы потребления кислорода сточной и речной воды.

## 7. Платежи за водопользование

Плата за водопользование включает в себя:

– плату за потребление воды питьевого качества, забираемой из водопровода населенного пункта;

– плату за сброс сточных вод (хозяйственно-бытовых, производственных, ливневых) в канализацию населенного пункта;

– плата за сброс загрязняющих веществ в подземные и поверхностные водные объекты.

Размер платы за потребление водопроводной воды и за сброс сточных вод в канализацию населенного пункта устанавливается его администрацией, точнее ее подразделением – «Водоканалом».

Размер платы за потребление водопроводной воды и сброс сточных вод в канализацию  $C$  определяется по формуле [7]:

$$C = Q_i \cdot C_o, \quad (7.1)$$

где  $Q_i$  – объем потребляемой воды  $i$ -м предприятием или расход сточных вод, сбрасываемых  $i$ -м предприятием в канализацию населенного пункта;

$C_o$  – стоимость  $1\text{м}^3$  водопроводной или сточной воды в данном населенном пункте.

Данная формула применяется, если предприятие не превышает лимитов по водопотреблению и сбросов сточных вод, установленных специальным договором, который заключается между каждым предприятием и «Водоканалом». В том случае, если данные лимиты превышены, размер платы за водопотребление и сброс сточных вод  $C'$  составляет:

$$C' = Q_i C_o + \Delta Q_i K_n C_o, \quad (7.2)$$

Где  $\Delta Q_i$  – объем водопроводной или сточной воды, превышающей оговоренный договором лимит,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

$K_n$  – повышающий коэффициент стоимости, устанавливаемый «Водоканалом», плата за лимитированный расход воды относится к себестоимости, а за превышающий лимит – из прибыли.

Стоимость  $1\text{м}^3$  водопроводной или сточной воды  $C_o$  определяется по формуле:

$$C_o = C_{сб} + \Delta\Pi, \quad (7.3)$$

где  $C_{сб}$  – себестоимость подготовки  $1\text{м}^3$  водопроводной или сточной воды, руб./год;

$\Delta\Pi$  – прибыль «Водоканала».

Прибыль составляет 10–25% от величины себестоимости.

Себестоимость подготовки  $1\text{м}^3$  воды  $C$ , руб./год, определяется по формуле:

$$C = \mathcal{E} / Q_i, \quad (7.4)$$

где  $\mathcal{E}$  – эксплуатационные затраты на подготовку воды объемом  $Q_i$  руб./год.

Эксплуатационные затраты  $\mathcal{E}$  определяются по формуле:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_4 + \mathcal{E}_5 + \mathcal{E}_6, \quad (7.5)$$

где  $\mathcal{E}_1$  – затраты на расходные материалы (реагенты) используемые при подготовке воды;

$\mathcal{E}_2$  – годовая стоимость электроэнергии, затрачиваемой в процессе подготовки воды;

$\mathcal{E}_3$  – заработная плата обслуживающего персонала;

$\mathcal{E}_4$  – стоимость текущего ремонта здания и оборудования (2.2 и 3.8%, соответственно, от капитальных затрат);

$\mathcal{E}_5$  – амортизационные отчисления для зданий и оборудования (3.8% и 12%, соответственно, от капитальных затрат);

$\mathcal{E}_6$  – мелкие неучтенные расходы:

$$\mathcal{E}_6 = 0,03 (\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_4 + \mathcal{E}_5) \quad (7.6)$$

Плата за сброс загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты взимается на основе Закона РФ «Об Охране окружающей природной среды» и постановления Правительства РФ № 632 от 28.08.92 г. Эта плата взимается со всех предприятий и организаций независимо от формы собственности. Внесение платы за загрязнение не освобождает водопользователей от выполнения природоохранных мероприятий, а также уплаты штрафов за экологические правонарушения и возмещения вреда причиняемого поверхностным и подземным источникам.

При расчете базовых нормативов оплаты за сброс загрязнений в водные источники применяются предельно-допустимые сбросы загрязняющих веществ.

В связи с изменением индекса цен к нормативам оплаты за загрязнение водных объектов применяются коэффициенты индексации платы ( $K_{ИН}$ ).

Плата за загрязнение водных объектов представляет собой форму возмещения экономического ущерба, вызываемого сбросом загрязняющих веществ в поверхностные и подземные источники, а также затрат на проектирование и строительство сооружений очистки природных и сточных вод.

Удельный экономический ущерб от сброса загрязнений в водные объекты ( $C_{y\partial}$ ) в пределах ПДС и лимита (временно согласованного сброса) составляет 443,5 руб./усл.т в ценах 1990 г.

Базовые нормативы платы по конкретным загрязнениям, сбрасываемым в водные объекты  $C_i$ , определяются по формуле [7]:

$$C_i = C_{y\partial} \cdot A_i \cdot K_{ИН}, \quad (7.7)$$

где  $A_i$  – показатель относительной опасности загрязнений.

Показатель относительной опасности загрязнений для всех веществ (кроме взвешенных веществ)  $A_i$  определяется по формуле [7]:

$$A_i = \frac{1}{ПДК_i}, \quad (7.8)$$

где  $ПДК_i$  – предельно-допустимая концентрация  $i$ -го вещества.

Для взвеси показатель опасности  $A_{в.в.}$  определяется по формуле:

$$A_{в.в.} = \frac{1}{C_{в.в.} + a}, \quad (7.9)$$

где  $C_{в.в.}$  – концентрация взвеси в водоеме, куда сбрасываются загрязненные сточные воды;

$a$  – допустимое для данной категории водоема увеличение концентрации взвеси в воде водоема после сброса в него загрязненных стоков.

Устанавливаются два вида базовых нормативов платы:

1) за выбросы загрязнений в водные объекты в пределах допустимых нормативов;

2) за выбросы загрязнений в пределах допустимых лимитов, т.е. временно согласованных нормативов.

Платежи в пределах допустимых нормативов сбросов загрязнений осуществляются за счет себестоимости продукции, а платежи за превышение нормативов – за счет прибыли предприятия.

С целью введения дифференцированных ставок платы за сброс загрязнений в водные объекты, при расчете платы за сброс вводятся коэффициент экологической ситуации и экологической значимости ( $K_{\text{Э}}$ ). Этот коэффициент оценивает экологию водных объектов в данном географическом районе и устанавливается Министерством охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ по бассейнам основных рек в разрезе экономических районов.

Также органами исполнительной власти субъектов федерации, автономных образований, г. Москвы и Санкт-Петербурга могут быть введены местные коэффициенты ( $K_{\text{Э}}^M$ ), повышающие  $K_{\text{Э}}$ .  $K_{\text{Э}}^M$  не может превышать  $K_{\text{Э}}$  более, чем в 2 раза.

Плановый годовой размер платежей за загрязнение водных объектов определяется предприятием, утверждается его руководителем и главным бухгалтером и согласуется с территориальным органом, ведающим охраной природы.

Общая плата за загрязнение поверхностных и подземных водных объектов  $P$  определяется по формуле:

$$P = P_{\text{ПДС}} + P_{\text{Л}} + P_{\text{С.Л.}}, \quad (7.10)$$

где  $P_{\text{ПДС}}$  – плата за сбросы загрязнений в размерах, не превышающих установленных предприятию ПДС:

$P_L$  – плата за сбросы загрязнений в пределах установленных предприятию лимитов;

$P_{C.L.}$  – плата за сверхлимитный сброс загрязняющих веществ.

$P_{ПДС}$ , руб./год, определяется по формуле:

$$P_{ПДС} = \sum C_i \cdot M_{\phi}^i, \quad (7.11)$$

где  $C_i$  – ставка платы за сброс 1 т  $i$ -го загрязнения;

$M_{\phi}^i$  – фактический сброс  $i$ -го загрязнения, т/год.

При этом  $M_{\phi}^i < M_{ПДС}^i$ ,

где  $M_{ПДС}^i$  – предельно-допустимый сброс  $i$ -го загрязнения.

Плата за сбросы загрязнений в пределах установленных предприятию лимитов  $P_L$  определяется по формуле:

$$P_L = \sum C_L^i \cdot (M_L^i - M_{ПДС}^i), \quad (7.12)$$

где  $C_L^i$  – базовый норматив платы за сброс 1 т  $i$ -го загрязнителя в пределах установленного лимита, руб.;

$M_L^i$  – сброс  $i$ -го загрязнителя в пределах установленного лимита.

Если в процессе согласования величины лимита размер  $C_L^i$  не оговаривается особо, то  $C_L^i$  определяется по формуле (7.7).

Плата за сверхлимитный сброс загрязняющих веществ  $P_{C.L.}$  определяется по формуле:

$$P_{C.L.} = 5 \sum C_L^i (M_{\phi}^i - M_L^i). \quad (7.13)$$

В том случае, если сброс сточных вод, содержащих загрязнения осуществляется на рельеф местности с согласия природоохранительных органов, то плата определяется как сброс в пределах ПДК.

Плата за сброс сточных вод на поля фильтрации не взимается при соблюдении установленных норм нагрузки сточных вод и загрязняющих веществ, а также правил эксплуатации сооружений. При несоблюдении этих условий плата определяется, как за сброс в водный объект в пределах установленных лимитов. То же касается сельскохозяйственных орошений.



## 8. Условия выпуска сточных вод в водоемы

Условия выпуска сточных вод в поверхностный водоем определяются народнохозяйственной их значимостью и характером водопользования. Выпуск сточных вод ухудшает качество воды в водоеме, однако это не должно отражаться на его дальнейшем использовании в качестве источника водоснабжения для культурных и спортивных мероприятий, рыбохозяйственных целей. Условия выпуска производственных сточных вод в водоемы регламентируют Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами и Правила санитарной охраны прибрежных районов морей. Выполнение условий спуска производственных сточных вод в водоемы контролируют санитарно-эпидемиологические станции и бассейновые управления. Правила устанавливают нормы качества воды водоемов, используемых в качестве источника для централизованного или нецентрализованного хозяйственно-питьевого водоснабжения, а также для водоснабжения предприятий пищевой промышленности, используемых для купания, спорта и отдыха населения.

Нормы качества воды в водоемах относят к створам, расположенным на протоках на 1 км выше ближайшего по течению пункта водопользования (водозабор для хозяйственно-питьевого водоснабжения, места купания и организованного отдыха, территории населенного пункта и т.д.), а на непроточных водоемах и водохранилищах на 1 км в обе стороны от пункта водопользования. Качество воды в водоемах рыбохозяйственного назначения регламентируют по двум видам водопользования: водоемы для воспроизводства и сохранения ценных пород рыб и водоемы для всех других рыбохозяйственных целей. В табл. 8.1 и 8.2 приведены ПДК вредных веществ в водоемах хозяйственно-питьевого, культурно-бытового и рыбохозяйственного водопользования [6].

Таблица 8.1

ПДК вредных веществ в водоемах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования

| Вещество  | ПДК, мг/л |
|---|-----------|
| 1   | 2         |
| А. По санитарно-токсикологическому лимитирующему показателю вредности |           |
| Анилин  | 0,100     |
| Бензол  | 0,500     |
| Бериллий  | 0,0002    |

Продолжение табл.8.1

| 1   | 2      |
|---|--------|
| Гексоген  | 0,100  |
| Гексаметилендиамин  | 0,010  |
| Свинец  | 0,100  |
| Тетраэтилсвинец   | 0,000  |
| Формальдегид  | 0,050  |
| Б. По общесанитарному лимитирующему показателю вредности    |        |
| Аммиак (по азоту)   | 2,000  |
| Диметилформамид   | 10,000 |
| Кадмий  | 0,010  |
| Капролактан   | 1,000  |
| Кобальт   | 1,000  |
| Медь  | 0,100  |
| Никель  | 0,100  |
| Тринитротолуол  | 0,500  |
| В. По органолептическому лимитирующему показателю вредности |        |
| Бензин  | 0,100  |
| Гексахлоран   | 0,020  |
| Гексахлорбензол   | 0,050  |
| Мышьяк  | 0,050  |
| Нитраты (по азоту)  | 10,000 |
| Нитрохлорбензол   | 0,050  |
| Пиридин   | 0,200  |
| Полиакриламид   | 2,000  |
| Роданиды  | 0,100  |
| Ртуть   | 0,005  |
| Динитробензол   | 0,500  |
| Дихлорбензол  | 0,002  |
| Дихлорфенол   | 0,002  |
| Дихлорэтан  | 2,000  |
| ДДТ   | 0,100  |
| Железо  | 0,500  |
| Керосин   | 0,100  |
| Нафтенновые кислоты   | 0,300  |
| Нефть: многосернистая                                       | 0,100  |
| прочая  | 0,300  |
| Пикриновая кислота  | 0,500  |
| Пропилен  | 0,500  |

Окончание табл. 8.1

| 1                          | 2     |
|----------------------------|-------|
| Сероуглерод                | 1,000 |
| Скипидар                   | 0,200 |
| Тиофос                     | 0,003 |
| Толуол                     | 0,500 |
| Фенол (карболовая кислота) | 0,001 |
| Хлорбензол                 | 0,100 |
| Хлорофос                   | 0,050 |
| Хром: трехвалентный        | 0,500 |
| шестивалентный             | 0,100 |
| Четыреххлористый углерод   | 5,000 |

Таблица 8.2

ПДК вредных веществ в водоемах рыбохозяйственного назначения

| Вещество  | ПДК, мг/л |
|---|-----------|
| Аммиак  | 0,100     |
| Кадмий  | 0,005     |
| Магний  | 50,000    |
| Сероуглерод   | 1,000     |
| Смолистые вещества, вымываемые из хвойных пород древесины         | 2,000     |
| Медь  | 0,010     |
| Мышьяк  | 0,050     |
| Нефть и нефтепродукты в растворенном и эмульгированном состояниях | 0,050     |
| Никель  | 0,010     |
| Свинец  | 0,100     |
| Таннины   | 10,000    |
| Фенолы  | 0,001     |
| Хлор свободный  | 0,000     |
| Цианиды   | 0,050     |
| Цинк  | 0,010     |

## Список литературы

1. ГОСТ 17.1.1.01-77. Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения.
2. Закон РФ Об охране окружающей природной среды 19.12.91г. № 2060-1 (ред. от 02.06.93). – М.: Республика, 1992.
3. Мельник Л.Г. Экономические проблемы воспроизводства природной среды. – Харьков: Вища школа, 1988. – 160 с.
4. Экологическая экономика. – 1994. – № 3/19.
5. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды. – М.: Экономика, 1986. – 94 с.
6. Комплексное использование водных ресурсы: учеб. пособие / С.В. Яковлев, И.Г. Губий, И.И. Павлинова, В.Н. Родин. – М.: Высш. шк., 2008. – 383 с.
7. Экономический ущерб и платежи за загрязнение окружающей природной среды: учеб. пособие / под ред. Ю.И. Азимова, Е.А. Силкина. – Казань: Изд-во КФЭИ, 1998. – 128 с.
8. Водный кодекс РФ от 16.11.95 г. № 167-ФЗ. Собрание законодательства РФ. 20.11.95 г. № 47.