

**Чистофорова Наталья Васильевна,**

к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: ryabinak@mail.ru

**Ушенин Захар Сергеевич,**

магистрант, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: zakhar.ushenin@yandex.ru

## **СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ВОДОРОДА ИЗ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВ**

**Chistoforova N.V., Ushenin Z.S.**

## **SYNTHESIS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR THE INSTALLATION OF HYDROGEN EXTRACTION FROM HYDROGEN-CONTAINING GASES**

**Аннотация.** Приведены материальные и тепловые балансы аппаратов мембранной установки извлечения водорода из водородсодержащих газов. Разработаны информационные схемы данных аппаратов. Предложены решения по автоматизации установки.

**Ключевые слова:** водородсодержащий газ, мембранная установка, пермеатор, сепаратор, теплообменник, синтез системы автоматического регулирования, материальный и тепловой баланс.

**Abstract.** The material and thermal balances of the apparatuses of the membrane facility for the extraction of hydrogen from hydrogen-containing gases are given. Information schemes for these devices have been developed. Solutions for plant automation are proposed.

**Keywords:** hydrogen from hydrogen-containing gases, membrane facility, permeator, separator, heat exchanger, synthesis of the automatic control system, material and thermal balances.

Водород широко используется в различных отраслях химической и нефтехимической промышленности. В чистом виде водород практически не встречается в природе, поэтому задачи его получения, концентрирования и очистки от примесей имеют огромное значение.

Основными способами получения чистого водорода в промышленности являются электролиз воды и конверсия кокса или метана. Кроме того, водород получают извлечением и концентрированием из различных газовых смесей нефтехимических процессов.

В настоящее время существует два наиболее эффективных способа извлечения водорода из водородсодержащих газов (ВСГ): извлечение водорода с помощью адсорбционных установок и концентрирование водорода при помощи мембранных установок. Выбор метода получения водорода зависит от состава сырья, необходимой чистоты водорода, а также от режима эксплуатации, производственной мощности и других факторов, связанных со спецификой работы конкретного предприятия.

К основным преимуществам мембранных установок, позволяющих концентрировать водород, можно отнести низкие расходы на техническое обслуживание, простое аппаратное оформление и длительный срок службы мембран. Стоит отдельно отметить, что мембранные установки отличаются высокой гибкостью, которая реализуется при создании модульных систем, позволяющих быстро изменять масштаб производства водорода. Метод концентрирования водорода при помощи

мембранных установок позволяет выделять водород из газовых потоков с минимальными потерями, поэтому было принято решение исследовать именно его.

Перед использованием мембранного способа концентрирования водорода необходимо произвести синтез системы автоматического регулирования (САР), который включает в себя исследование установки, в данном случае основанный на анализе материального и теплового балансов аппаратов, имеющий конечной целью установление управляющих воздействий, контролируемых и неконтролируемых возмущений, а также управляемых переменных. Результатом синтеза САР является предложение решения по автоматизации аппаратов.

Схема установки извлечения водорода из ВСГ приведена на рисунке 1.

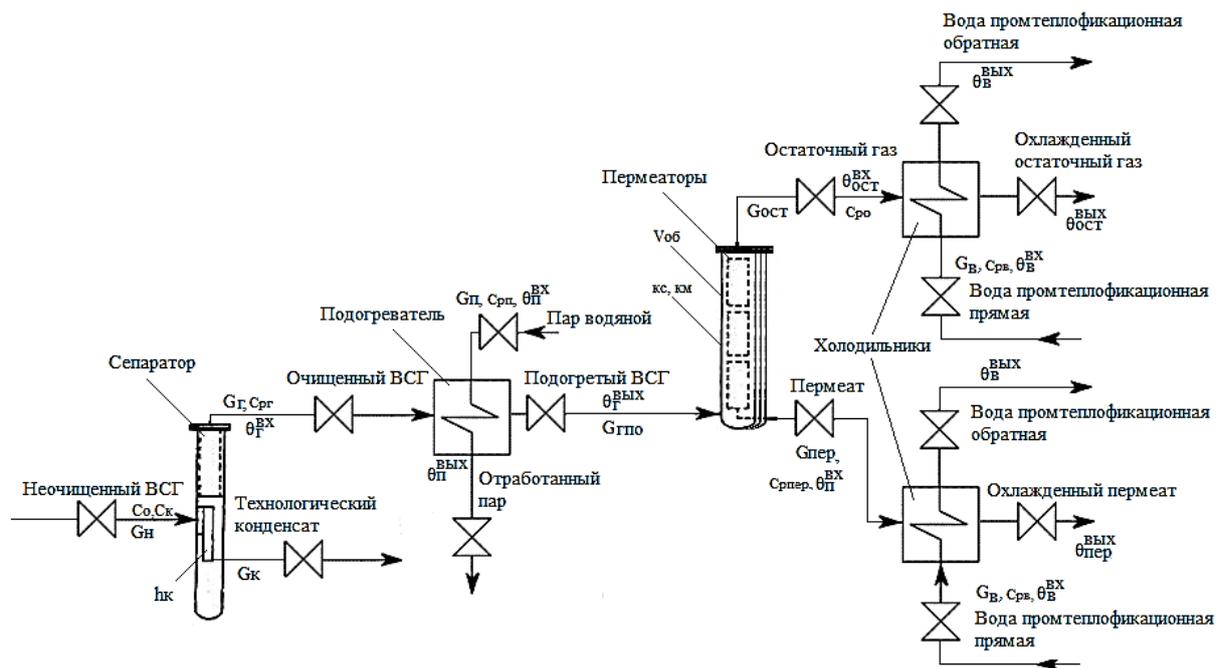


Рисунок 1 – Установка извлечения водорода из ВСГ

Неочищенный водородосодержащий газ ( $G_H$ ) подается в сепаратор для тонкой очистки, с целью разделения на очищенный ВСГ ( $G_r$ ) и технологический конденсат ( $G_k$ ). Технологический конденсат выводится из низа сепаратора и покидает объект. Очищенный ВСГ ( $G_r$ ) поступает в подогреватель (теплообменник) и нагревается водяным паром до температуры ( $\theta_r^{ВЫХ}$ ) с помощью теплоносителя ( $G_n$ ). С целью поддержания ( $\theta_r^{ВЫХ} = \theta_{зд}$ ). Показателем эффективности является ( $\theta_r^{ВЫХ}$ ). Отработанный пар выводится из подогревателя и покидает объект.

Подогретый и отфильтрованный ВСГ ( $G_{гпо}$ ) поступает в пермеаторы, содержащие тысячи полых мембранных волокон. ВСГ проходит внутри волокон, при этом остаточные газы ( $G_{ост}$ ) проникают через стенку мембраны, и из противоположного конца волокна выходит чистый водород (пермеат) ( $G_{пер}$ ) под давлением. Далее потоки с пермеатом ( $G_{пер}$ ) и остаточным газом ( $G_{ост}$ ) поступают в (отведенные для каждого потока) холодильники для охлаждения протеплофикационной

водой ( $G_B$ ), после чего выводятся из объекта. Промтеплофикационная вода после холодильников также покидает объект.

Основным качественным показателем процесса является объёмная степень извлечения водорода  $\varphi_{H_2}$ , которая характеризует количество целевого продукта (водорода технического), полученного из принятого на установку сырья (ВСГ), и определяется формулой:

$$\varphi_{H_2} = \frac{G_{H_2} \cdot C_{H_2}}{G_{ВСГ} \cdot C_{ВСГ}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $G_{ВСГ}$  и  $G_{H_2}$  – расход ВСГ и водорода технического, соответственно, м<sup>3</sup>/ч;

$C_{H_2}$  и  $C_{ВСГ}$  – содержание водорода в водороде техническом и в ВСГ, соответственно, %<sub>об.</sub>

Степень извлечения (без учёта работоспособности мембран) может значительно изменяться в зависимости от параметров технологического режима пермеаторов (давление ВСГ, температура ВСГ после парового подогревателя, давление водорода на выходе из блока пермеаторов), а также от содержания водорода в ВСГ. Оптимальное значение  $\varphi_{H_2}$  во всех случаях должно составлять более 75 % при условии содержания водорода в ВСГ не менее 90 %<sub>об.</sub>

Материальный баланс по всему веществу в сепараторе.

Уравнение динамики [1]:

$$\rho_k \cdot S \cdot \frac{dh_k}{dt} = G_H \cdot (C_K + C_O) - G_r \cdot C_O - G_K \cdot C_K \quad (2)$$

Уравнение статики при  $\frac{dh_k}{dt} = 0$ :

$$G_H \cdot (C_K + C_O) = G_r \cdot C_O + G_K \cdot C_K, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения сепаратора, м<sup>2</sup>;  $h_k$  – уровень конденсата, м;  $\rho_k$  – плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup>;  $G_H$  – расход неочищенного ВСГ, м<sup>3</sup>/с;  $G_r$  – расход очищенного ВСГ, м<sup>3</sup>/с;  $G_K$  – расход конденсата, м<sup>3</sup>/с.

Следовательно, расход очищенного ВСГ  $G_r$  – возрастает, а скорость роста уровня конденсата  $h_k$  – убывает при повышении концентрации чистого газа ( $C_O$ ). При росте же концентрации конденсата ( $C_K$ ):  $G_r$  – убывает,  $h_k$  – возрастает.

На основании (2) и (3) можно принять:

$$h_k = f(G_H, G_K). \quad (4)$$

Предпочтительное управляющее воздействие –  $G_K$ .

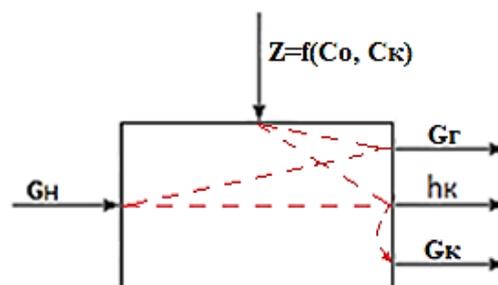


Рисунок 2– Информационная схема сепаратора

Возможное управляющее воздействие:  $G_H$ .

Возможное неконтролируемое возмущение:  $C_O, C_K$ .

Возможные управляемые переменные:  $h_k, G_k, G_r$ .

Математическое описание на основе физики процесса в подогревателе.

Движение теплоносителей осуществляется при заданных  $\theta_{\Pi}^{BX}, \theta_{\Pi}^{ВЫХ}, \theta_r^{ВЫХ}, \theta_r^{BX}$ .

Движущая сила процесса:

$$\Delta\theta_{cp} = \frac{\Delta\theta_n + \Delta\theta_k}{2}, \quad (5)$$

где  $\Delta\theta_n = \theta_{\Pi}^{BX} - \theta_r^{ВЫХ}, \Delta\theta_k = \theta_{\Pi}^{ВЫХ} - \theta_r^{BX}$ .

Тепловая нагрузка аппарата:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta\theta_{cp}, \quad (6)$$

где  $Q$  – количество тепла, Дж/с;  $K$  – коэффициент теплопередачи, Дж/(м<sup>2</sup>·°К·с);  $F$  – поверхность теплопередачи, м<sup>2</sup>;  $\Delta\theta_{cp}$  – средняя движущая сила при теплопередаче, °К.  $Q$  (Дж/с) позволяет определить  $G_{\Pi}^{эфф}$  и  $G_r^{эфф}$  на основе тепловых балансов:

$$Q = G_{\Pi} \cdot c_{рп} \cdot (Q_{\Pi}^{BX} - Q_{\Pi}^{ВЫХ}), \quad (7)$$

где  $c_{pi}$  – удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг·град).

$$G_{\Pi}^{эфф} = \frac{Q}{c_{рп} \cdot (Q_{\Pi}^{BX} - Q_{\Pi}^{ВЫХ})}, \quad (8)$$

$$Q = G_r \cdot c_{рг} \cdot (\theta_r^{ВЫХ} - \theta_r^{BX}), \quad (9)$$

$$G_r^{эфф} = \frac{Q}{c_{рг} \cdot (\theta_r^{ВЫХ} - \theta_r^{BX})}. \quad (10)$$

Эффективное время пребывания:

$$t_{\text{преб}}^{эфф} = \frac{\rho_r \cdot V_r}{G_r^{эфф}} = T_{об}. \quad (11)$$

Математическое описание на основе теплового баланса в подогревателе.

Уравнение динамики:

$$\rho_r \cdot V_r \cdot c_{рг} \cdot \frac{d\theta_r^{ВЫХ}}{dt} = G_{\Pi} \cdot c_{рп} \cdot (\theta_{\Pi}^{BX} - \theta_{\Pi}^{ВЫХ}) - G_r \cdot c_{рг} \cdot (\theta_r^{ВЫХ} - \theta_r^{BX}). \quad (12)$$

Уравнение статики при  $\frac{d\theta_r^{ВЫХ}}{dt} = 0$ :

$$G_{\Pi} \cdot c_{рп} \cdot (\theta_{\Pi}^{BX} - \theta_{\Pi}^{ВЫХ}) = G_r \cdot c_{рг} \cdot (\theta_r^{ВЫХ} - \theta_r^{BX}). \quad (13)$$

На основании (12) и (13) можно принять:

$$\theta_r^{ВЫХ} = f(G_{\Pi}, G_r). \quad (14)$$

Предпочтительное управляющее воздействие –  $G_{\Pi}$ .

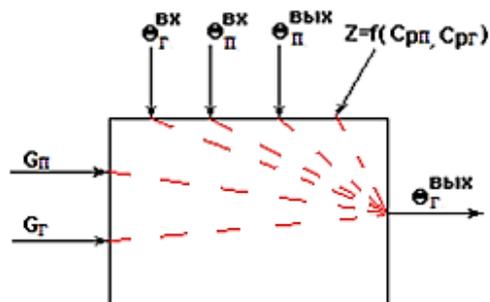


Рисунок 3 – Информационная схема подогревателя

Возможные управляющие воздействия:  $G_r, G_{\Pi}$ .

Возможные контролируемые возмущения:  $\theta_r^{BX}, \theta_{\Pi}^{BX}, \theta_{\Pi}^{ВЫХ}$ .

Возможные неконтролируемые возмущения:  $c_{рг}, c_{рп}$ .

Возможная управляемая переменная:  $\theta_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}}$ .

Анализ динамических характеристик подогревателя.

Уравнение динамики в нормализованном виде.

$$\rho_{\Gamma} \cdot V_{\Gamma} \cdot c_{\text{пр}} \cdot \frac{d\theta_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}}}{dt} + G_{\Gamma} \cdot c_{\text{пр}} \cdot \theta_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}} = G_{\Pi} \cdot c_{\text{пр}} \cdot (\theta_{\Pi}^{\text{ВХ}} - \theta_{\Pi}^{\text{ВЫХ}}) + G_{\Gamma} \cdot c_{\text{пр}} \cdot \theta_{\Gamma}^{\text{ВХ}}. \quad (15)$$

На основе этого уравнения динамики объект по каналу  $G_{\Pi} - \theta_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}}$  описывается математической моделью апериодического звена 1-го порядка:

$$W(p) = \frac{K_{\text{об}}}{T_{\text{об}} \cdot p + 1}, \quad (16)$$

где  $T_{\text{об}} = \frac{\rho_{\Gamma} \cdot V_{\Gamma}}{G_{\Gamma}}$ ;  $K_{\text{об}} = \frac{G_{\Pi}^0 \cdot c_{\text{пр}} \cdot (\theta_{\Pi}^{\text{ВХ}^0} - \theta_{\Pi}^{\text{ВЫХ}^0})}{G_{\Gamma}^0 \cdot c_{\text{пр}} \cdot \theta_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}^0}}$ .

Объект имеет транспортное запаздывание:

$$\tau_{\text{тр}} = \frac{\rho_{\Pi} \cdot V_{\text{труб}}}{G_{\Pi}^{\text{ВХ}}} = \tau_{\text{об}}, \quad (17)$$

где  $V_{\text{труб}}$  – объем трубопровода от регулирующего органа до входа в аппарат.

Таким образом, в целом динамика объекта по каналу управления описывается математической моделью апериодического звена 1-го порядка с запаздыванием:

$$W(p) = \frac{K_{\text{об}}}{T_{\text{об}} \cdot p + 1} \cdot e^{-p \cdot \tau_{\text{об}}}. \quad (18)$$

Математическое описание на основе физики процесса в пермеаторах.

"Быстрые" газы проникают через стенку мембраны легче, чем "медленные" газы, разделяя первоначальную смесь газов на два потока. Чистоту желаемых потоков можно регулировать, изменяя рабочие условия.

Массообмен осуществляется в три фазы. Молекулы газа:

- растворяются в мембране со стороны высокого давления;
- распыляются по структуре полимера на другой стороне мембраны;
- испаряются на стороне низкого давления.

Растворимость и скорость передвижения газа в полимере зависит как от химического характера и молекулярной структуры газа, так и от структуры полимера.

Эти параметры ведут к определению проницаемости:

$$K = D \cdot S, \quad (19)$$

где  $K$  – проницаемость,  $D$  – коэффициент диффузии,  $S$  – растворимость.

Самой медленной из трех указанных выше стадий является перемещение газа в полимере. Поток определяется по общему закону диффузии:

$$F = D \cdot dC / dX, \quad (20)$$

где  $C$  – концентрация в полимере,  $X$  – направление перемещения.

Если  $e$  – толщина мембраны, тогда:

$$G_{\text{пер}} = D \cdot A \cdot (C_2 - C_1) / e, \quad (21)$$

где  $G_{\text{пер}}$  – расход пермеата,  $A$  – площадь мембраны,  $C_2$  – концентрация компонента газа со стороны высокого давления,  $C_1$  – концентрация компонента газа со стороны низкого давления.

Концентрация на каждой границе прямо связана с парциальным давлением:

$$C_1 = S \cdot P_1, \quad (22)$$

$$C_2 = S \cdot P_2. \quad (23)$$

Следовательно:

$$G_{\text{пер}} = D \cdot S \cdot A \cdot (P_2 - P_1) / e, \quad (24)$$

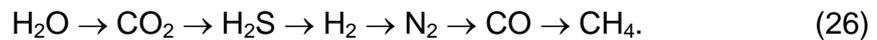
$$G_{\text{пер}} = K \cdot A \cdot (P_2 - P_1) / e. \quad (25)$$

Эта связь основополагающая и показывает, что основными параметрами для расхода являются:

- разница парциального давления  $\Delta P = (P_2 - P_1)$ , которая также называется движущей силой;
- проницаемость, которая зависит от характера газа и полимера, а также от изменения температуры процесса пермеации.

Быстрые газы текут, в основном, к растворенному веществу, а медленные газы остаются, главным образом, в остатке. Все газы можно сравнить с одним эталонным газом, которым является водород. Соотношение  $K_{\text{водорода}}$  к  $K_{\text{газа}}$  называется избирательностью. Чем она выше, тем медленнее газ.

Скорость переноса компонентов ВСГ через полимерные волокна мембраны уменьшается в нижеприведённом ряду:



Так, при понижении температуры мембран, увеличивается скорость переноса компонентов, имеющих, в указанном выше ряду, коэффициент проницаемости больший, чем у водорода (таким образом, возможно понижение проницаемости  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  и т.д., но с одновременным повышением проницаемости воды; кроме того, понижение температуры мембраны во всех случаях приводит к значительному понижению производительности мембран и возможности конденсации влаги на их поверхности). При повышении температуры мембран, соответственно, увеличивается скорость переноса компонентов, коэффициент проницаемости которых меньше, чем у водорода (так, возможно понижение проницаемости паров воды, но с одновременным повышением проницаемости  $\text{CO}$ ; кроме того, повышение температуры мембраны во всех случаях приводит к неблагоприятным температурным напряжениям полимера, и, как следствие, ускорению процесса «старения» диффузионного слоя мембраны).

При любой температуре, поддерживаемой в пермеаторах, к повышению качества пермеата (равно как по содержанию водорода, так и  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ) ведёт искусственное понижение перепада давления на мембране (особенно при нагрузке пермеаторов по сырью, приближённой к номиналу). Однако уменьшение перепада (как и понижение температуры) приводит к значительному перетоку водорода в остаточный газ (уменьшению степени извлечения водорода из сырья), т.е. перегрузке установки по сырью с соответствующим перерасходом всех ресурсов. Такой режим работы имеет определённый предел по нагрузке пермеаторов, выше которого увеличение нагрузки уже не влияет на количество выдаваемого водорода.

Материальный баланс по всему веществу в пермеаторах.

Уравнение динамики:

$$\rho_{\text{пер}} \cdot K_M \cdot \frac{V_{\text{об}}}{G_{\text{пер}}} \cdot \frac{dG_{\text{пер}}}{dt} = G_{\text{ГПО}} - G_{\text{ост}} \cdot K_C - G_{\text{пер}} \cdot K_M. \quad (27)$$

Уравнение статики при  $\frac{dG_{пер}}{dt} = 0$ :

$$G_{гпо} = G_{ост} \cdot K_c + G_{пер} \cdot K_M, \quad (28)$$

где  $G_{гпо}$  – расход подогретого и очищенного ВСГ, кг/с;  $\rho_{пер}$  – плотность пермеата, кг/м<sup>3</sup>;  $G_{ост}$  – расход остаточного газа, кг/с;  $G_{пер}$  – расход пермеата, кг/с;  $V_{об}$  – объем пермеатора, м<sup>3</sup>;  $K_M$  – коэффициент, характеризующий качество мембранных волокон;  $K_c$  – коэффициент, характеризующий качество мембранной стенки.

На основании (27) и (28) можно считать, что  $G_{пер}$  зависит от всех предшествующих объектов: сепаратора, который влияет на степень чистоты ВСГ; подогревателя, поддерживающего оптимальную температуру процесса; а также парциального давления, на которое влияет расход среды; следовательно:

$$G_{пер} = f(G_{гпо}), \quad (29)$$

Предпочтительное управляющее воздействие  $G_{гпо}$ .

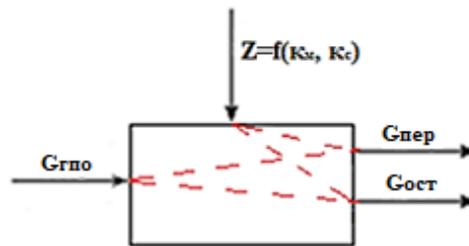


Рисунок 4 – Информационная схема пермеатора

Возможное управляющее воздействие:  $G_{гпо}$ . Возможное неконтролируемое возмущение:  $K_M, K_c$ . Возможные управляемые переменные:  $G_{пер}, G_{ост}$ .

Математическое описание на основе физики процесса в холодильниках.

Т.к. холодильники ничем не отличаются друг от друга, примем  $\theta_{пер}^{ВХ} = \theta_{ост}^{ВХ}$ .

Описание будем производить для  $\theta_{пер}^{ВХ}$ .

Движение теплоносителей осуществляется при заданных  $\theta_{пер}^{ВХ}, \theta_{пер}^{ВЫХ}, \theta_{В}^{ВЫХ}, \theta_{В}^{ВХ}$ .

Движущая сила процесса:

$$\Delta\theta_{ср} = \frac{\Delta\theta_n + \Delta\theta_k}{2}, \quad (30)$$

где  $\Delta\theta_n = \theta_{пер}^{ВХ} - \theta_{В}^{ВЫХ}$ ,  $\Delta\theta_k = \theta_{пер}^{ВЫХ} - \theta_{В}^{ВХ}$ .

Тепловая нагрузка аппарата:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta\theta_{ср}, \quad (31)$$

$Q$  (Дж/с) позволяет определить  $G_{пер}^{эфф}$  и  $G_{В}^{эфф}$  на основе тепловых балансов:

$$Q = G_{В} \cdot c_{рв} \cdot (Q_{В}^{ВЫХ} - Q_{В}^{ВХ}), \quad (32)$$

$$G_{В}^{эфф} = \frac{Q}{c_{рв} \cdot (Q_{В}^{ВЫХ} - Q_{В}^{ВХ})}, \quad (33)$$

$$Q = G_{пер} \cdot c_{рпер} \cdot (\theta_{пер}^{ВХ} - \theta_{пер}^{ВЫХ}), \quad (34)$$

$$G_{пер}^{эфф} = \frac{Q}{c_{рпер} \cdot (\theta_{пер}^{ВХ} - \theta_{пер}^{ВЫХ})}. \quad (35)$$

Эффективное время пребывания:

$$t_{преб}^{эфф} = \frac{\rho_{пер} \cdot V_{пер}}{G_{пер}^{эфф}} = T_{об}. \quad (36)$$

Математическое описание на основе теплового баланса в холодильниках.

Уравнение динамики:

$$\rho_{\text{пер}} \cdot V_{\text{пер}} \cdot c_{\text{рпер}} \cdot \frac{d\theta_{\text{пер}}^{\text{ВЫХ}}}{dt} = G_{\text{В}} \cdot c_{\text{рв}} \cdot (\theta_{\text{В}}^{\text{ВЫХ}} - \theta_{\text{В}}^{\text{ВХ}}) - G_{\text{пер}} \cdot c_{\text{рпер}} \cdot (\theta_{\text{пер}}^{\text{ВХ}} - \theta_{\text{пер}}^{\text{ВЫХ}}). \quad (37)$$

Уравнение статики при  $\frac{d\theta_{\text{пер}}^{\text{ВЫХ}}}{dt} = 0$ :

$$G_{\text{В}} \cdot c_{\text{рв}} \cdot (\theta_{\text{В}}^{\text{ВЫХ}} - \theta_{\text{В}}^{\text{ВХ}}) = G_{\text{пер}} \cdot c_{\text{рпер}} \cdot (\theta_{\text{пер}}^{\text{ВХ}} - \theta_{\text{пер}}^{\text{ВЫХ}}), \quad (38)$$

На основании (37) и (38) можно принять:

$$\theta_{\text{пер}}^{\text{ВЫХ}} = f(G_{\text{В}}, G_{\text{пер}}). \quad (39)$$

Предпочтительное управляющее воздействие –  $G_{\text{В}}$ .

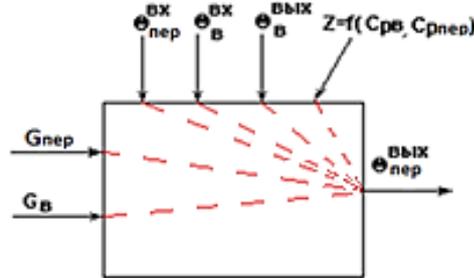


Рисунок 5 – Информационная схема холодильников

Возможные управляющие воздействия:  $G_{\text{пер}}, G_{\text{В}}$ . Возможные контролируемые возмущения:  $\theta_{\text{пер}}^{\text{ВХ}}, \theta_{\text{В}}^{\text{ВХ}}, \theta_{\text{В}}^{\text{ВЫХ}}$ . Возможные неконтролируемые возмущения:  $c_{\text{рпер}}, c_{\text{рв}}$ . Возможная управляемая переменная:  $\theta_{\text{пер}}^{\text{ВЫХ}}$ .

Анализ динамических характеристик холодильника.

Уравнение динамики в нормализованном виде:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{пер}} \cdot V_{\text{пер}} \cdot c_{\text{рпер}} \cdot \frac{d\theta_{\text{пер}}^{\text{ВЫХ}}}{dt} + G_{\text{пер}} \cdot c_{\text{рпер}} \cdot \theta_{\text{пер}}^{\text{ВЫХ}} = \\ = G_{\text{В}} \cdot c_{\text{рв}} \cdot (\theta_{\text{В}}^{\text{ВЫХ}} - \theta_{\text{В}}^{\text{ВХ}}) + G_{\text{пер}} \cdot c_{\text{рпер}} \cdot \theta_{\text{пер}}^{\text{ВХ}}. \end{aligned} \quad (40)$$

На основе этого уравнения динамики объект по каналу  $G_{\text{В}} - \theta_{\text{пер}}^{\text{ВЫХ}}$  описывается математической моделью аperiodического звена 1-го порядка:

$$W(p) = \frac{K_{\text{об}}}{T_{\text{об}} \cdot p + 1}, \quad (41)$$

где:  $T_{\text{об}} = \frac{\rho_{\text{пер}} \cdot V_{\text{пер}}}{G_{\text{пер}}}$ ;  $K_{\text{об}} = \frac{G_{\text{В}} \cdot c_{\text{рв}} \cdot (\theta_{\text{В}}^{\text{ВЫХ}0} - \theta_{\text{В}}^{\text{ВХ}0})}{G_{\text{пер}} \cdot c_{\text{рпер}} \cdot \theta_{\text{пер}}^{\text{ВЫХ}0}}$ .

Объект имеет транспортное запаздывание:

$$\tau_{\text{тр}} = \frac{\rho_{\text{В}} \cdot V_{\text{труб}}}{G_{\text{В}}^{\text{ВХ}}} = \tau_{\text{об}}, \quad (42)$$

где  $V_{\text{труб}}$  – объем трубопровода от регулирующего органа до входа в аппарат.

Таким образом, в целом динамика объекта по каналу управления описывается математической моделью аperiodического звена 1-го порядка с запаздыванием:

$$W(p) = \frac{K_{\text{об}}}{T_{\text{об}} \cdot p + 1} \cdot e^{-p \cdot \tau_{\text{об}}}. \quad (43)$$

Типовое решение автоматизации сепаратора.

Для регулирования уровня используем САР по отклонению [2] (рисунок 6).

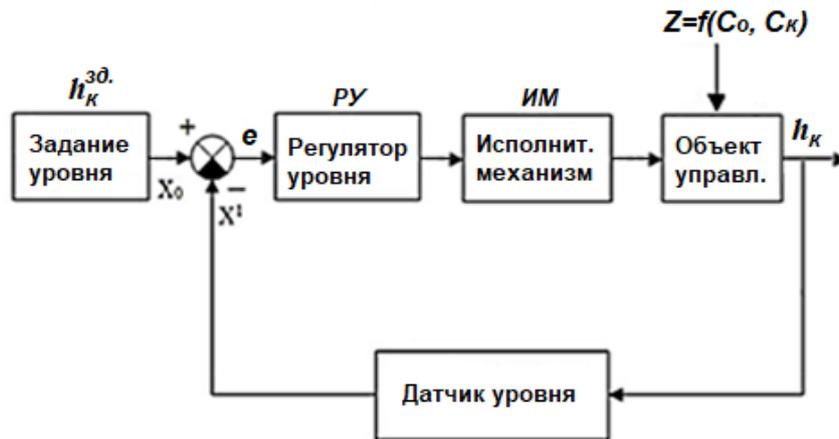


Рисунок 6 – Структурная схема регулирования по отклонению уровня конденсата в сепараторе

Работа схемы заключается в следующем: сигнал по отклонению от заданного значения ( $h_k^{зд.}$ ) поступает с датчика уровня на регулятор (РУ), где сравнивается с заданным значением. Если уровень в объекте ниже заданного значения, то сигнал с датчика ( $X_1$ ) равен сигналу с задатчика ( $X_0$ ) и сигнал ошибки ( $e$ ) на входе регулятора ( $X_1 - X_0$ ) равен нулю - сигнала на выходе регулятора нет, (ИМ) не работает и клапан закрыт. Если, например, уровень ( $h_k$ ) превысит заданное значение или станет равен ему, то увеличится и сигнал с датчика ( $X_1$ ), возникнет ошибка ( $e$ ), заработает (ИМ), как следствие, клапан откроется, что в свою очередь приведет к уменьшению уровня конденсата в сепараторе, уровень в объекте уменьшится до значения ниже заданного и клапан закроется.

Типовое решение автоматизации подогревателя и холодильников.

В качестве решения можно применить двухконтурную систему регулирования, но т.к. температурные колебания ВСГ на входе в теплообменник незначительные, то рациональнее применить САР по отклонению (рисунок 7).

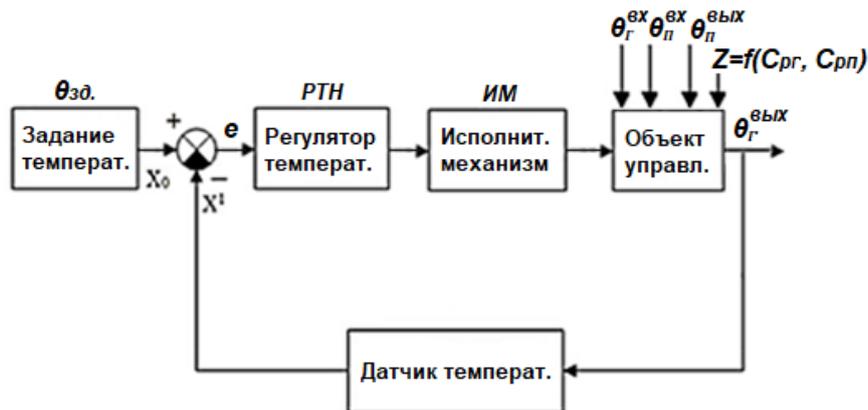


Рисунок 7 – Структурная схема регулирования температуры газа на выходе из теплообменника

Схема действует следующим образом: сигнал по отклонению от заданного значения поступает с датчика температуры на регулятор тепловой нагрузки (РТН),

где сравнивается с заданной температурой ( $\theta_{зд}$ ). Если температура в объекте равна заданной, то сигнал с датчика ( $X_1$ ) равен сигналу с задатчика ( $X_0$ ) и сигнал ошибки ( $e$ ) на входе регулятора ( $X_1 - X_0$ ) равен нулю, следовательно, сигнала на выходе регулятора нет, (ИМ) не работает и клапан открыт на необходимую величину, поддерживая заданную температуру. Если, например, температура ( $\theta_r^{вых}$ ) превысит заданную, то увеличится и сигнал с датчика ( $X_1$ ), возникнет ошибка ( $e$ ), заработает (ИМ), как следствие, клапан прикроется, что в свою очередь приведет к уменьшению подачи тепла (расхода водяного пара), температура в объекте уменьшится до заданного значения.

Предложенные решения можно будет реализовать при разработке новой АСУТП или же внести корректировки в действующие системы, в результате чего повысится качество извлечения водорода, снизятся потери рабочего времени, уменьшится простой оборудования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кафаров В.В., Макаров В.В. Гибкие автоматизированные системы в химической промышленности: Учебник для вузов. - М.: Химия, 1990. - 320с.
2. Дудников Е.Г. Автоматическое управление в химической промышленности. - М.: Химия, 1987. - 368 с.