

УДК 681.518

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Е. А. МУРАВЬЕВА<sup>1</sup>, С. А. ШОКУРОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>muraveva\_ea@mail.ru, <sup>2</sup>shokurov-sergei@mail.ru

Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ)

*Поступила в редакцию 21 октября 2019 г.*

**Аннотация.** В статье разработана система управления давлением в конденсаторе-испарителе по математической модели объекта управления (ОУ). Предлагается использование такой модели для управления инерционными технологическими параметрами. Данная система позволяет точно регулировать инерционные параметры путем прогнозирования будущего состояния объекта управления по его математической модели. В этой системе текущее состояние объекта управления подается на нечеткий регулятор, который подбирает управляющие воздействия. Состояние объекта управления передается на модель, которая прогнозирует изменение параметра и подает его будущее значение на нечеткий регулятор для корректировки управляющих воздействий.

**Ключевые слова:** фреоновая холодильная установка; хлор; фреон; конденсатор-испаритель; нечеткий регулятор; хлор-математическая модель конденсатора-испарителя.

### ВВЕДЕНИЕ

Нечеткий регулятор (НР) активно используется для управления технологическими процессами [1–8]. Широкое распространение получило использование НР в различных системах управления [9–10]. Предлагается использование НР в системе управления инерционным параметром по математической модели ОУ. Такая система может применяться для управления давлением в конденсаторе-испарителе. Конденсатор-испаритель представляет собой кожухотрубный аппарат. В его межтрубном пространстве кипит фреон, а в трубках конденсируется газообразный хлор. Основным регулируемым инерционным параметром объекта управления является давление в конденсаторе-испарителе. Из-за неточностей регулирования давления в аппарате не удается добиться требуемой температуры жидкого

хлора. Внедрение системы управления позволит строго регулировать давление в аппарате в любой момент времени. Существующее регулирование давления основано на передаче управляющего воздействия на объект управления с исполнительного устройства (клапана). Данная система не всегда позволяет строго регулировать параметры аппарата. Предлагается использование системы с обратной связью, при которой текущее состояние объекта управления, а также промоделированное будущее состояние давления по модели ОУ будут подаваться на НР для формирования управляющих воздействий.

Уровень жидкого фреона в конденсаторе-испарителе поддерживается клапаном за счет подачи жидкого фреона от переохладителя.

Давление фреона регулируется клапаном, установленным на входе компрессора.

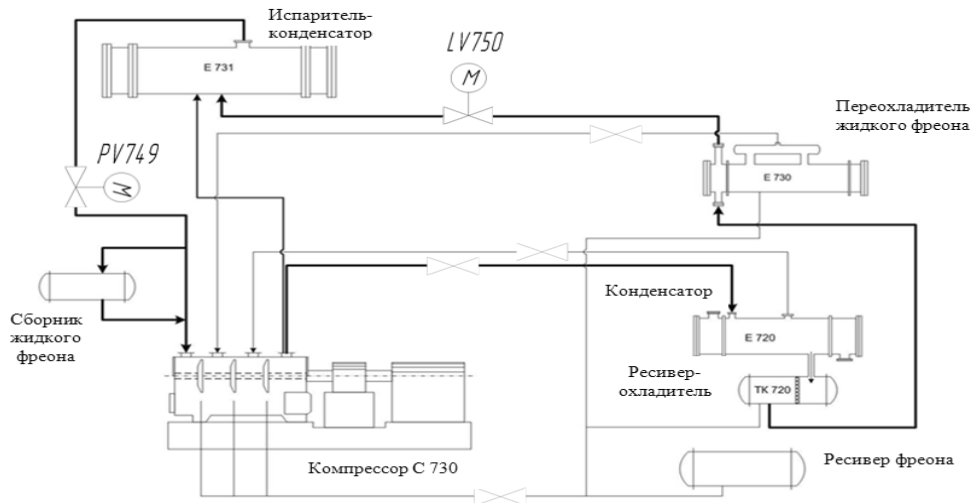


Рис. 1. Технологическая схема компрессорной установки

Место конденсатора-испарителя в технологической схеме компрессорной установки представлено на рис. 1.

Давление в конденсаторе-испарителе регулируется для изменения температуры конденсируемого продукта (хлора). Из-за неточностей регулирования давления зачастую не удастся получить сжиженный хлор заданной температуры, потому что изменяется температура кипения фреона.

Для реализации вышеописанной системы управления разработаем нечеткий регулятор для управления конденсатором-испарителем и модель ОУ.

### СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ КОНДЕНСАТОРА-ИСПАРИТЕЛЯ

Регулируемыми параметрами НР являются степени открытия клапанов LV-750 и PV-749, которые отвечают соответственно за уровень и давление в конденсаторе-испарителе.

Разработаем регулятор для этих переменных.

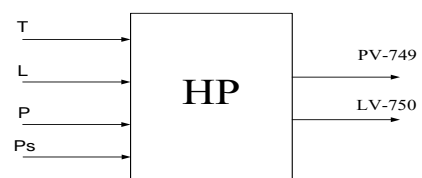
На вход нечеткого регулятора подаются:

- температура хлора  $T$ , идущего в аппарат,  $[-16 \div 16]$  °С;
- уровень фреона  $L$  в конденсаторе  $[0 \div 100]$  %;
- давление в конденсаторе-испарителе,  $[0 \div 2]$  кгс/см<sup>2</sup>;
- давление в конденсаторе-испарителе через заданное количество точек,  $[0 \div 2]$  кгс/см<sup>2</sup>.

Выходными переменными регулятора являются степени открытия клапанов LV-750 и PV-749 в процентах, с помощью первого осуществляется регулирование уровня фреона в конденсаторе-испарителе, а второй регулирует давление в нем.

На рис. 2 представлена концептуальная модель нечеткого регулятора для управления регулирующими клапанами.

Расчет нечеткого регулятора для конденсатора-испарителя состоит из следующих этапов: фаззификация, агрегирование, активизация, аккумуляция, дефаззификация.



$T$  – входная переменная температуры хлора;

$L$  – входная переменная уровня фреона

$P$  – текущее давление в аппарате;

$P_s$  – моделируемое значение давления;

$PV-749$  – выходная переменная, характеризующая степень открытия клапана для регулирования давления в аппарате,

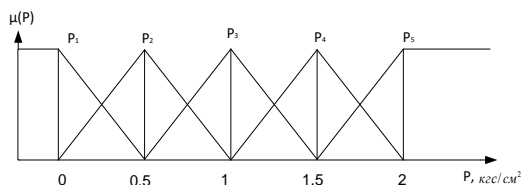
$LV-750$  – выходная переменная, характеризующая степень открытия клапана для регулирования уровня фреона в аппарате

Рис. 2. Концептуальная модель нечеткого регулятора

Для синтеза нечеткого регулятора предлагается методика, основанная на экспертной информации [11].

Для входных термов вершина треугольника функции принадлежности находится в опорной точке, а его основание соединяют соседние по отношению к вершине треугольника опорные точки.

Для описания входных лингвистических переменных: «Температура хлора на вход в конденсатор-испаритель», «Давление в конденсаторе-испарителе», «Уровень фреона в конденсаторе-испарителе», «Моделируемое давление в конденсаторе-испарителе», будем использовать по пять термов, представленных на рис. 3. Крайние термы данных лингвистических переменных имеют форму трапеций. Совокупность всех термов перекрывает полностью область возможных значений входных параметров.



**Рис. 3.** Лингвистическая переменная «Текущее давление в конденсаторе-испарителе», «Моделируемое давление в конденсаторе-испарителе»

Для описания лингвистических переменных «LV-750» и «PV-749» будем использовать пять термов. Крайние термы имеют симметричную треугольную форму. При любом значении функции принадлежности выходной переменной крайним термам их центр тяжести не будет смещаться. Это позволяет задать минимальное и максимальное значения выходной функции.

На вход регулятора подаются три переменные, каждая из которых представлена пятью термами. Тогда количество правил составит  $5^3 = 125$ .

Будем использовать продукционные правила с двойным консеквентом:

Если  $T = Ti$  и  $L = Li$  и  $P=Pi$ ,  $Ps=Psi$  то  $PV=PVi$  и  $PV=PVCjj$ ,  $LV=LVi$  и  $LV=LVCkk$ , где  $Ci$ ,  $Ck$ – степени принадлежности переменной к термам  $PVi$ ,  $LVi$ .

Термы  $PVi$  и  $PVj$  являются соседними, и, следовательно, их функции принадлежности пересекаются. Степени принадлежности  $Cj$  и  $Ck$  следует выбирать таким образом, чтобы

хотя бы одна из них равнялась 1. Это обеспечит одинаковый вес каждого правила.

Выходная переменная при срабатывании только одного правила будет лежать между центрами тяжести термов  $Ci$  и  $Cj$ . Следовательно, продукционное правило можно разрабатывать по следующему алгоритму:

- из области четкости термов «Температура хлора на вход», «Давление в конденсаторе», «Уровень хладагента в конденсаторе» antecedента продукционного правила выбирается опорная точка;
- находится желаемое значение выхода НР (степень открытия клапана);
- рассчитываются центры тяжести всех термов выходной лингвистической переменной;
- выбирается консеквент продукционного правила:
  - если желаемое значение совпадает с одним из центров тяжести термов, то в консеквенте продукционного правила для данного выхода указывается данный терм;
  - если желаемое значение не совпадает ни с одним из центров тяжести термов, то в консеквенте продукционного правила для данного выхода указывается два терма с необходимыми степенями принадлежности.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНДЕНСАТОРА-ИСПАРИТЕЛЯ

Известны зависимости давления, плотности и теплоемкости фреона от температуры [12]. Они представлены графическими данными, которые аппроксимируются и представляются в виде аналитических выражений. Соответственно, добавляем эти зависимости в разрабатываемую динамическую модель.

Зависимость плотности фреона в  $\text{кг/м}^3$  от температуры и давления принимает следующее выражение:

$$\rho(T, p) = (-0,6259 \cdot T^2 - 25,353 \cdot T + 1572,3) \cdot bf^{\left(\frac{p}{101325} - 1\right)},$$

где  $T$  – температура фреона в  $^{\circ}\text{C}$ ;

$bf$  – коэффициент сжатия фреона, принимаемый равным 0,995;

$p$  – давление фреона в Па.

Зависимость теплоемкости фреона от температуры в Дж/кг·К принимает следующее выражение:

$$Cp_{fg}(T) = 0,5583 \cdot T^2 + 7,9825 \cdot T + 866,61;$$

где  $T$  – температура фреона в °С.

Зависимость парциального давления фреона от температуры в Па принимает следующее выражение:

$$Prf(T) = (7 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 0,0014 \cdot T^2 \cdot 0,1001 T + 3,9588) \cdot 10^5;$$

где  $T$  – температура фреона в °С.

В справочных данных были найдены две кривые, по которым возможно проводить аппроксимацию парциального давления хлора от температуры (в зависимости от температурного диапазона). Зададим условие, что, если температура хлора меньше 239,4 К, тогда используем первое уравнение аппроксимированной кривой, иначе – второе.

Тогда уравнение для нахождения парциального давления хлора в Па примет вид:

$$Prh(t) = \begin{cases} 10^{8,0213 - \frac{530,591}{nT - 64,63}}, & \text{Если } nT < 239,4, \\ 10^{9,28814 - \frac{969,992}{nT - 12,791}}, & \text{Иначе} \end{cases}$$

где  $nT$  – температура хлора в К.

Теплота конденсации хлора зависит только от его температуры и потому эта кривая аппроксимируется по графику, представленному в справочных данных [13] и представляется аналитическим выражением.

Теплота конденсации хлора от его температуры представлена в Дж/кг

$$C_{condh}(T) = -0,0298 \cdot T^3 - 1,643 \cdot T^2 - 517,06 \cdot T + 267940,$$

где  $T$  – температура хлора в °С.

Переменная  $p_1$  хранит в себе значение уровня в конденсаторе-испарителе в процентах от объема межтрубного пространства. Если он составляет в определенный момент времени менее 100%, то дозволено продолжать его наполнять, срабатывает логическая "1", иначе логический "0".

Переменная  $p_2$  хранит в себе текущее значение давления в аппарате в Па, если оно меньше парциального давления фреона при заданной температуре, за которую отвечает результат функции парциального давления

фреона  $Prf(p_3)$  от температуры  $p_3$ , то это говорит о том, фреон конденсируется, иначе – испаряется. Переменная  $p_4$  хранит в себе значения о величине температуры хлора в °С.

Таким образом,  $Lf_1(p)$  отвечает за блокировку уровня фреона по его подаче, а  $Lf_2(p)$  по испарению и конденсации фреона, которые будут зависеть от величины парциального давления фреона и давления в аппарате.

Вышесказанное ложится в основу разработки аналитического выражения для блокировки максимального и минимального уровней в конденсаторе-испарителе

$$Lf_1 = \begin{cases} 1, & \text{Если } p_1 < 100 \\ 0, & \text{Иначе} \end{cases},$$

$$Lf_2(p) = \begin{cases} \text{Если } (Prf(p_3) - p_2) > 0 \\ \begin{cases} 1, & \text{Если } p_1 > 0 \\ 0, & \text{Иначе} \end{cases} \\ \text{Иначе} \\ \begin{cases} 1, & \text{Если } P_1 < 100 \\ 0, & \text{Иначе} \end{cases} \end{cases}.$$

Пропишем объемы испарившегося и сконденсировавшегося хладона за 1 с. Эти процессы будут зависеть от коэффициента диффузии фреона  $k_1$  (показывает скорость его испарения), межтрубного пространства  $V_f$ . Для процесса конденсации будет происходить обратный процесс, поэтому укажем отрицательное выражение соотношению.

Используем блокировку  $Lf_2(p)$ , которая остановит конденсацию или испарение фреона в математической модели, если уровень приблизится к максимальному и минимальному значениям. Коэффициент  $k_1$  обусловлен физическими свойствами фреона и показывает быстроту его испарения (конденсации). С учетом фактора атмосферного давления условие приводится к виду  $Prf(p_3) > p_2 + 101325$ .

Выражение  $(1 - \frac{p_2 + 101325}{Prf(p_3)})$  показывает интенсивность испарения. Чтобы найти текущие значения заполненного объема выполним  $\frac{p_1}{100} \cdot V_f$ .

Вышесказанное ложится в основу разработки аналитического выражения для объема, испарившегося (сконденсировавшегося) хладона в м<sup>3</sup> за 1 секунду, представленного формулой.

$$Visp(p) = \begin{cases} Lf_2(p)k_1 \left(1 - \frac{p_2 + 101325}{Prf(p_3)}\right) \frac{p_1}{100} Vf, \\ \text{Если } Prf(p_3) > p_2 + 101325 \\ -Lf_2(p)k_1 \left(1 - \frac{Prf(p_3)}{p_2 + 101325}\right) \frac{p_1}{100} Vf \text{ Иначе} \end{cases},$$

где  $k_1$  – коэффициент диффузии фреона;

$Vf$  – объем межтрубного пространства конденсатора-испарителя,  $m^3$ .

Для дальнейших расчетов потребуется величина, равная произведению теплоемкости на массу для жидкого и газообразного фреона вместе, измеряемая в  $\frac{Дж \cdot кг}{К}$

$$Cpf(p, dm) = Cpf(p_3) \cdot \left[ Vf \cdot \frac{p_1}{100} \cdot pof(p_3, p_2) + Vf \cdot \frac{100 - p_1}{100} \cdot \frac{(p_2 + 101325)}{10^5 \cdot R \cdot (273,15 + p_3)} + dm \right],$$

где  $Mf$  – молярная масса фреона,  $кг/моль$ ;  $dm$  – масса поступающего жидкого фреона,  $кг$ .

Объемный приход хлора будет напрямую зависеть от расхода хлора в конденсаторе. Умножим концентрацию хлора в хлоргаза на давление хлора от его температуры (от переменной  $p_4$ ), т.к. переменная  $p_4$  отвечает за хранение данных о температуре хлора в  $^{\circ}C$ . Получим  $\frac{Conc}{100} \cdot Prh(p_4)$ . Если это значение меньше, чем давление хлора в системе с одной атмосферой  $Ph + 101325$  (избыточное давление будет всегда на 1 атмосферу меньше абсолютного), то хлор начнет конденсироваться. Выразим эту зависимость в  $m^3/с$ . Стоит заметить, что если вышеуказанное условие выполнено не будет, то конденсация хлора происходить не будет.

Поэтому справедливо будет утверждать, что зависимости примут следующие соотношения

$$Gcond(p) = \begin{cases} k_3 \cdot \left(1 - \frac{\frac{Conc}{100} \cdot Prh(p_4)}{Ph + 101325}\right) \cdot Vh \cdot \frac{Conc}{100}, \\ \text{Если } \frac{Conc}{100} \cdot Prh(p_4) < Ph + 101325 \\ 0 \text{ Иначе} \end{cases}$$

где  $k_3$  – коэффициент диффузии хлора;  $Conc$  – концентрация хлора в хлоргазе, %;  $Ph$  – давление хлора в хлоргазе, Па;  $Vh$  – Объем внутритрубного пространства,  $m^3$ .

Количество сконденсированного хлора выразим в моль/с.

$$Vhg(p) = \frac{\left(\frac{Gh}{Mh}\right) \cdot R \cdot (p_4 + 273,15)}{(Ph + 1) \cdot 101325},$$

где  $Gh$  – расход хлора,  $m^3/с$ ;

$Mh$  – молярная масса хлора,  $кг/моль$ ;

$R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot K)$ ;

$Vh$  – объем внутритрубного пространства,  $m^3$ .

Таким образом, имеем полный базис зависимостей для определения уравнений, описывающих процессы в конденсаторе-испарителе.

Рассмотрим каждое из уравнений подробнее.

Уравнение для уровня в % будем определяться разностью поступающего в конденсатор-испаритель фреона и паров его испарения

$$dL(p) = Lf_1(p) \cdot \frac{Gf \cdot a_1}{Vf} - Visp(p),$$

где  $Gf$  – расход хлора,  $m^3/с$ ;

$a_1$  – степень открытия клапана на подачу жидкого фреона, %.

Величина поступающего фреона будет определяться дробью  $\frac{Gf \cdot a_1}{Vf}$ .

Эта дробь, где числитель является произведением расхода фреона  $Gf$  на степень открытия клапана по подаче жидкого фреона  $a_1$ , а знаменатель –  $Vf$  объемом межтрубного пространства. Соответственно, это отношение позволит находить степень наполненности аппарата фреоном. Умножим это выражение на  $Lf_1(p)$  – блокировка подачи фреона по его подаче, чтобы не допустить переполнение аппарата.

Уравнение для определения температуры фреона в  $^{\circ}C$  примет вид:

$$dTf(p) = \frac{-Visp(p) \cdot pof(p_3, p_2) \cdot Cisp}{Cpf(p, 0) + Cp} +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{(T_{atm}-p_3) \cdot T_p(p_4-p_3) \cdot \text{alfa} \cdot S_1}{C_{pf}(p,0)+C_p} + \\
 & + \frac{p_3 \cdot C_{pf}(p,0)+}{C_{pf}(p, Gf \cdot a_1 \cdot \text{pof}(T_{f_1}, P_{f_1})) + C_p} + \\
 & + \frac{T_{f_1} \cdot C_{pfg}(T_{f_1}) \cdot Gf \cdot a_1 \cdot \text{pof}(T_{f_1}, P_{f_1})}{C_{pf}(p, Gf \cdot a_1 \cdot \text{pof}(T_{f_1}, P_{f_1})) + C_p} + \\
 & + \frac{p_3 \cdot C_p}{C_{pf}(p, Gf \cdot a_1 \cdot \text{pof}(T_{f_1}, P_{f_1})) + C_p} \cdot p_3
 \end{aligned}$$

где  $C_{isp}$  – теплота конденсации хлора, Дж/кг;  $T_{atm}$  – температура окружающего воздуха, °C;  $T_p$  – теплотери при перепаде в 1 °C, Дж/К;  $S_1$  – площадь теплопередачи от фреона к хлору, м<sup>2</sup>;  $\text{alfa}$  – коэффициент теплопроводности, Дж/(м<sup>2</sup>·К);  $C_p$  – теплоемкость стенок аппарата, Дж/(кг·К);  $T_{f_1}$  – Температура жидкого фреона на вход в конденсатор-испаритель, °C;  $P_{f_1}$  – Давление жидкого фреона на вход в конденсатор-испаритель, Па.

Первая дробь в уравнении показывает изменение температуры фреона без учета подачи его новой жидкой фазы.

Рассмотрим слагаемые в числителе:

$-Visp(p) \cdot \text{pof}(p_3, p_2) \cdot C_{isp}$  – расход теплоты при испарении, Дж;

$(T_{atm}-p_3) \cdot T_p$  – потеря теплоты в атмосфере, Дж;

$(p_4-p_3) \cdot \text{alfa} \cdot S_1$  – принятое от хлора теплота, Дж.

Температуру фреона в °C найдем как отношение общего количества теплоты на сумму теплоемкости текущего фреона и теплоемкости конденсатора-испарителя

$$\begin{aligned}
 & \frac{-Visp(p) \cdot \text{pof}(p_3, p_2) \cdot C_{isp}}{C_{pf}(p,0)+C_p} + \\
 & + \frac{(T_{atm}-p_3) \cdot T_p}{C_{pf}(p,0)+C_p} + \frac{(p_4-p_3) \cdot \text{alfa} \cdot S_1}{C_{pf}(p,0)+C_p},
 \end{aligned}$$

заметим, что учитывается теплоемкость стенок аппарата  $C_p$ .

Вторая дробь в уравнении показывает изменение температуры фреона с учетом подачи его новой жидкой фазы.

Рассмотрим слагаемые в числителе:

$p_3 \cdot C_{pf}(p,0)$  – теплота, полученная фреоном, уже находящимся в аппарате, Дж;

$T_{f_1} \cdot C_{pfg}(T_{f_1}) \cdot Gf \cdot a_1 \cdot \text{pof}(T_{f_1}, P_{f_1})$  – тепло от поступающего фреона, Дж;  $p_3 \cdot C_p$  – теплота, отданная стенкам аппарата, Дж.

Температуру фреона °C найдем как отношение общего количества теплоты на сумму теплоемкости прибывающего (убывающего) фреона и теплоемкости стенок конденсатора-испарителя

$$\begin{aligned}
 & \frac{p_3 \cdot C_{pf}(p,0)+}{C_{pf}(p, Gf \cdot a_1 \cdot \text{pof}(T_{f_1}, P_{f_1})) + C_p} + \\
 & + \frac{T_{f_1} \cdot C_{pfg}(T_{f_1}) \cdot Gf \cdot a_1 \cdot \text{pof}(T_{f_1}, P_{f_1})}{C_{pf}(p, Gf \cdot a_1 \cdot \text{pof}(T_{f_1}, P_{f_1})) + C_p} + \\
 & + \frac{p_3 \cdot C_p}{C_{pf}(p, Gf \cdot a_1 \cdot \text{pof}(T_{f_1}, P_{f_1})) + C_p}
 \end{aligned}$$

заметим, что учитывается теплоемкость стенок аппарата  $C_p$ .

И чтобы найти изменение температуры из суммы дробей (текущее значение температуры), вычтем предыдущее значение температуры  $p_3$  в °C.

Чтобы найти давление, рассмотрим четыре слагаемых формулы.

$$\begin{aligned}
 dP(p) = & \left[ \frac{p_2+101325) \cdot (100-p_1)}{100 - \left[ p_1 + Lf_1(p) \cdot \frac{Gf \cdot a_1}{Vf} - Visp(p) \right]} - \right. \\
 & \left. - p_2 - 101325 + \right. \\
 & \left. + \frac{R \cdot (273,15+p_3) \cdot \frac{Visp(p) \cdot \text{pof}(p_3, p_2)}{Mf}}{Vf \cdot 101325} + \right. \\
 & \left. + \frac{(p_2+101325) \cdot dTf(p)}{273,15+p_3} - (p_2-P_{f_2}) \cdot \frac{a_2}{100} \cdot k_2, \right.
 \end{aligned}$$

где  $k_2$  – пропускная способность штуцера фреона из аппарата;  $a_2$  – степень открытия клапана на выход паров фреона, %;  $P_{f_2}$  – Давление паров фреона перед компрессором, Па.

Слагаемое

$$\left[ \frac{(p_2+101325) \cdot (100-p_1)}{100 - \left[ p_1 + Lf_1(p) \cdot \frac{Gf \cdot a_1}{Vf} - Visp(p) \right]} \right]$$

показывает зависимость изменения давления от уровня.

Выражение

$$\left[ \frac{(p_2+101325) \cdot (100-p_1)}{100 - \left[ p_1 + Lf_1(p) \cdot \frac{Gf \cdot a_1}{Vf} - Visp(p) \right]} \right],$$

получено из закона Бойля-Мариотта.

Дробь

$$\frac{R \cdot (273,15 + p_3) \cdot \frac{V_{isp}(p) \cdot p_{of}(p_3, p_2)}{M_f}}{V_f \cdot 101325}$$

показывает изменение давления при испарении. Оно получено из закона Менделеева-Клайперона.

Слагаемое

$$\frac{p_2 + 101325) \cdot dT_f(p)}{273,15 + p_3}$$

учитывает изменение давления от температуры. Оно получено из закона Шарля.

Дробь

$$(p_2 - P_f) \cdot \frac{a_2}{100}$$

показывает изменение давления от выхода газообразного фреона.

Разработаем уравнение для описания изменения температуры хлора

$$\begin{aligned} dTh(p) = & \frac{-(p_4 - p_3) \cdot \text{alfa} \cdot S_1 + G_{\text{cond}}(p) \cdot C_{\text{condh}}(p_4)}{C_{pgh} \cdot \frac{(Ph + 101325) \cdot V_h}{R \cdot (273,15 + p_4)} - \frac{V_{hg}(p) \cdot (p_4 - Th_1)}{V_h - V_{hg}(p)}} \end{aligned}$$

где  $C_{pgh}$  – теплоемкость жидкого хлора, Дж/кг·К;  $Th_1$  – Температура хлора на вход в аппарат, °C;  $P_f$  – Давление паров фреона перед компрессором, Па.

Рассмотрим первую дробь. В числителе слагаемое  $-(p_4 - p_3) \cdot \text{alfa} \cdot S_1$  показывает теплоту, отданную фреону,  $G_{\text{cond}}(p) \cdot C_{\text{condh}}(p_4)$  учитывает теплоту конденсации хлора. В знаменателе  $C_{pgh} \cdot \frac{(Ph + 101325) \cdot V_h}{R \cdot (273,15 + p_4)}$  – теплоемкость хлора [14].

Вторая дробь  $\frac{V_{hg}(p) \cdot (p_4 - Th_1)}{V_h - V_{hg}(p)}$  показывает изменение температуры хлора за счет его поступления с хлорного компрессора.

#### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЕМ В КОНДЕНСАТОРЕ-ИСПАРИТЕЛЕ ПО БЕЗЫРНЕЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим замкнутую систему управления. В этой системе текущее состояние объекта управления подается на нечеткий регулятор, а тот в свою очередь подбирает управляющие воздействия. В данном случае – это

степени открытия арматуры (рис. 4). Состояние объекта управления передается на модель, она прогнозирует изменение давления и подает его будущее значение на нечеткий регулятор для корректировки управляющих воздействий.

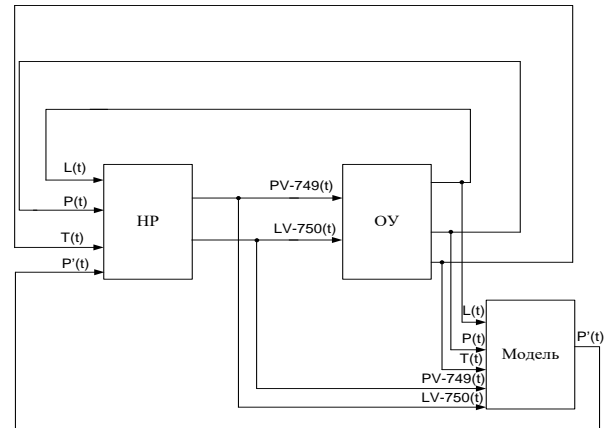


Рис. 4. Замкнутая система управления с нечетким регулятором

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель ОУ. Модель описывает ключевые процессы в аппарате: испарение фреона, конденсация хлора, изменение уровня фреона и давления в аппарате. В основу модели положены уравнения, характеризующие вышеописанные процессы, что позволяет использовать ее для проектирования и расчета аппаратов теплопередачи через стенку с фазовыми переходами теплоносителей различных характеристик.

Разработана система управления давлением в конденсаторе-испарителе по математической модели объекта управления. Нечеткий регулятор может использоваться в системе управления инерционным технологическим параметром по безынерционной модели.

Авторы выражают благодарность д-ру техн. наук, проф. Г. В. Гореловой, а также канд. техн. наук, главному конструктору по направлению, зав. лабораторией НИИ МВС ЮФУ В. В. Коробкину за высказанные замечания и пожелания по улучшению статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев К. А., Муравьева Е. А., Султанов Р.Г. и др. Нечеткий регулятор с двойной базой продукционных

правил // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля, 2016: материалы междунар. науч.-метод. конф., посвящ. 60-летию ф-ла УГНТУ в г. Салавате. Салават, 2016. С. 374-377. [Solovyov K. A., Muravyova E. A., Sultanov R. G., Hakimov T. I., "Fuzzy controller with double base of production rules" (In Russian) in Proc. International scientific and methodological conference to the 60th anniversary of UGNTU Branch in Salavat, Integration of science and education in oil and gas universities, Salavat, 2016.]

2. **Соловьев К. А., Муравьева Е. А., Чариков П. Н.** и др. Нечеткий регулятор второго порядка // Information Technologies for Intelligent Decision Making Support ITIDS'2015 Proceedings of the 3rd International Conference. General Chair Woman: Yusupova Nafisa. 2015, pp. 26-30. [Solovyov K. A., Muravyova E. A., Charikov P. N., Sharipov M. I., "Second order fuzzy controller" in Proc. Information Technologies for Intelligent Decision Making Support ITIDS'2015 Proceedings of the 3rd International Conference, 2015]

3. **Соловьев К. А., Муравьева Е. А.** Эталонная модель для системы управления технологическим процессом на базе нечеткого регулятора второго порядка // Современные проблемы науки и образования в техн. вузе: сб. материалов II междунар. науч.-практ. конф. Стерлитамак, 2015. С. 61-66. [Solovyov K. A., Muravyova E. A., "Reference model for control system of technological process on the basis of the fuzzy controller of second order" (In Russian) in Proc. II international scientific and practical conference, Sterlitamak, 2015]

4. **Соловьев К. А., Муравьева Е. А.** Синтез эталонной модели для системы управления технологическим процессом на базе нечеткого регулятора второго порядка // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 10. С. 42-46. [Solovyov K. A., Muravyova E. A., "Synthesis of a reference model for a process control system based on a second-order fuzzy controller" (In Russian) Aviakosmicheskoe priborostoenie, № 10, PP. 42-46, 2015.]

5 **Соловьев К. А., Муравьева Е. А., Султанов Р. Г.** и др. Синтез нечеткого регулятора для управления соотношением расходов «газ - воздух» на основе режимной карты // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн./УГНТУ. 2015. № 1. С. 275-291. URL: [http://ogbus.ru/issues/1\\_2015/ogbus\\_1\\_2015\\_p275-291](http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p275-291) Solovyov K.A.,\_ru.pdf. [Solovyov K. A., Muravyova E. A., Sultanov R. G., Solovyova O. I., "Synthesis of fuzzy controller to control the ratio of "gas - air" on the basis of the regime map" (In Russian) Neftegazovoe delo: electronic scientific journal, UGNTU, № 1, PP. 275-291, 2015. Available: [http://ogbus.ru/issues/1\\_2015/ogbus\\_1\\_2015\\_p275-291](http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p275-291) Solovyov K.A.,\_ru.pdf.]

6. **Соловьев К. А., Муравьева Е. А., Султанов Р. Г.** Адаптация нечеткого регулятора // Нефтегазовое дело: науч.-техн. журн./ УГНТУ. 2014. Т.12, № 3. С. 123-128. URL: <http://ngdelo.ru/article/view/1727> [Solovyov K. A., Muravyova E. A., Sultanov R. G., "Adapting the fuzzy controller" (In Russian) Neftegazovoe delo: scientific journal, UGNTU, Vol. 12, №3, PP. 123-128, 2014, Available: <http://ngdelo.ru/article/view/1727>]

7. **Каяшев А. И., Муравьева Е. А., Габитов Р. Ф.** Четкий логический регулятор для управления технологическими процессами: пат. на изобретение RUS 2445669 15.02.2010. [Kayashev A.I., Muravyova E.A., Gabitov R.F., Clear logic controller for process control: patent for invention RUS 2445669 15.02.2010.]

8. **Соловьев К. А., Надршин А. С., Баширов М. Г.** и др. Нечеткий регулятор с двойной базой правил, Патент на полезную модель Российской Федерации 167890 RU /

заявлено:16.12.2015/ опубликовано: 21.01.17 Бюл. № 2. [Solovyov K.A., Nadrshin A. S., Bashirov M.G., Sultanov R.G., Solovyova O.I., Muravyova E.A., Krishko K.A., Gareev I.M., "Fuzzy controller with double rule base" (In Russian) Utility model patent of the Russian Federation 167890.]

9. **Куленко М. С., Буренин С. В.** Исследование применения нечетких регуляторов в системах управления технологическими процессами // «Вестник ИГЭУ» Вып. 2. 2010 г. С. 1-5. [Kulenko M.S., Burenin S.V., "Research of application of fuzzy controllers in process control systems" (In Russian) "Vestnik IGEY" Vol. 2, PP. 1-5., 2010.]

10. **Муравьева Е. А., Соловьев К. А., Григорьев Е. С.** Разработка системы управления инерционным технологическим параметром по безынерционной модели // Труды пятой Всероссийской конференции "Информационный технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", Уфа, 2017, С. 60-63. [Muravyova E. A., Solovyov K. A., Grigoriev E.S. "Development of a control system of the inertial technological parameters according to the inertia-free model" (In Russian), In Proc. ITIDS'2017 Proseedings Ufa, Vol. 1, PP. 60-63, 2017.]

11. **Муравьева Е. А., Соловьев К. А., Султанов Р. Г.** и др. Синтез нечеткого регулятора с заданной многомерной статической характеристикой // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. /УГНТУ. 2015. № 1. С. 245-260. URL: [http://ogbus.ru/issues/1\\_2015/ogbus\\_1\\_2015\\_p245-260](http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p245-260). Muraveva E. A.,\_ru.pdf. [ Muravyova E. A., Solovyov K. A., Sultanov R. G., Solovyova O. I., "Synthesis of fuzzy controller with a given multidimensional static characteristic" (In Russian). Neftegazovoe delo: electronic scientific journal / UGNTU, № 1, PP. 245-260, 2015. Available: [http://ogbus.ru/issues/1\\_2015/ogbus\\_1\\_2015\\_p245-260](http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p245-260). Muraveva E. A.,\_ru.pdf.]

12. **Зависимость** температуры кипения фреонов от давления [Электронный ресурс]. URL: <http://www.xiron.ru/content/view/10/27/> (дата обращения: 05.03.2017). [(2017, March 5). "The dependence of the boiling point of freons on pressure" [Online]. Available: <http://www.xiron.ru/content/view/10/27/> ]

13. **Теплопроводность**, теплоемкость, свойства фреона [Электронный ресурс]. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/organicheskie-gazy/teploprovodnost-teploemkost-svoystva-freona-22> (дата обращения: 05.03.2017). [(2017, March 5). "Thermal conductivity, heat capacity, properties of Freon" [Online]. Available: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/organicheskie-gazy/teploprovodnost-teploemkost-svoystva-freona-22> ]

14. **Сжижение** хлора [Электронный ресурс]. URL: <http://chem21.info/info/149269/> (дата обращения: 05.03.2017). [(2017, March 5) "Liquefaction of chlorine" [Online]. Available: <http://chem21.info/info/149269/> ]

15. **Зависимость** температуры насыщения фреона от давления [Электронный ресурс]. URL: <https://masterxoloda.ru/4/zavisimost-temperature-nasyshheniya-freona-ot-davleniya> (дата обращения: 05.03.2017). [(2017, March 5). "Dependence of the saturation temperature of freon on pressure" [Online]. Available: <https://masterxoloda.ru/4/zavisimost-temperature-nasyshheniya-freona-ot-davleniya> ]

16. **Глинка Н.Л.** Общая химия. Л.: Химия, 1988., 704с. [N. L. Glinka, "General chemistry" (In Russian). L.: Khimia, 1988.]



17. **Кипер Р.А.** Свойства веществ: Справочник. Хабаровск, 2009 - 387 с. [Kiper R.A. "Property of substance: Handbook" (In Russian). Khabarovsk, 2009.]

#### METADATA

**Title:** USING FUZZY CONTROLLER TO PREDICT THE STATE OF THE CONTROL OBJECT

**Authors:** E. A. Muravyova<sup>1</sup>, S. A. Shokurov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Petroleum Technical University (UGNTU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>muraveva\_ea@mail.ru, <sup>2</sup>shokurov-sergei@mail.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** SIIT (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 2 (2), pp. 42-50, 2019. ISSN 2686-7044 (Online), ISSN 2658-5014 (Print).

**Abstract:** In the article the pressure control system in the condenser evaporator using object mathematical model is developed. Using of such model for control of inertial technological parameters is offered. This system allows to accurately adjust the inertial parameters by predicting the future state of the control object using its mathematical model. In this system, the current state of the control object is fed to the fuzzy controller, which selects the control actions. The state of the control object is transferred to the model, which predicts the changes of the parameter and submits its future value to the fuzzy controller to adjust the control effects.

**Key words:** freon refrigeration unit; chlorine; Freon; condenser-evaporator; fuzzy controller; chlorine mathematical model of condenser-evaporator.

**About authors:**

**MURAVYOVA, Elena Alexandrovna**, Professor, doctor of engineering, Head Dept. of Automated technological and information systems (USATU, 2013).

**SHOKUROV, Sergei Aleksandrovich**, student Dept. of Automated technological and information systems.