

УДК 528.4

DOI: 10.15827/2311-6749.16.4.11

## **АЛГОРИТМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ГЛАВНОГО БРОЖЕНИЯ ПИВА**

*Нийонсаба Т., магистр, nitherence@mail.ru; Павлов В.А., к.в.н., доцент  
(Тверской государственной технической университет, наб. Аф. Никитина, 22,  
г. Тверь, 170026, Россия)*

В статье обосновывается порядок разработки одного из важнейших элементов автоматизированной системы управления многопараметрическим технологическим процессом – регулятора управляющего воздействия. Основное внимание уделено обоснованию выбора типа регулятора, обеспечивающего наиболее эффективное решение задач управления, определению его оптимальных настроек, а также закона регулирования.

Для выбора регулятора проведен анализ параметров SISO (single-input single-output – один вход и один выход) и ММО (multiple-input multiple-output – много входов и много выходов) технологических процессов, их взаимосвязей и взаимозависимостей. Исследованы переходные процессы в астатической и статической системах. Получены передаточные функции подпроцессов нагревания и охлаждения и на этой основе проведено моделирование работы регуляторов И, П, ПИ, ПИД. Рассчитаны значения параметров регулятора, и на основе их сравнения выбран ПИД-регулятор, обеспечивающий наиболее эффективное решение задач управления многопараметрическими технологическими процессами.

Разработан алгоритм работы регулятора при управлении многопараметрическим технологическим процессом главного брожения пива.

Моделирование работы регулятора и определение его рабочих параметров осуществлены в рабочей среде Matlab.

**Ключевые слова:** управление многопараметрическим технологическим процессом, регулятор, переходная характеристика процесса, параметры.

Технологический процесс – это часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда. Технологические процессы представляют собой законченный этап создания продукта. К технологическим процессам можно отнести, например, главное брожение пива, измельчение цемента, термообработку какао-бобов и другие [1, 2].

Технологические процессы характеризуются своими параметрами, отражающими те или иные их свойства, например, время протекания процесса, температура и динамика ее изменения, потребительские свойства продукта и динамика их изменения и др.

Различают однопараметрические и многопараметрические технологические процессы [2].

Однопараметрические технологические процессы имеют единственный на входе и на выходе измеряемый параметр (SISO-single-input single).

Многопараметрический технологический процесс характеризуется несколькими показателями, и эти показатели часто коррелированы между собой, поэтому необходимо учитывать их взаимосвязь и взаимозависимость, чтобы получить качественный продукт.

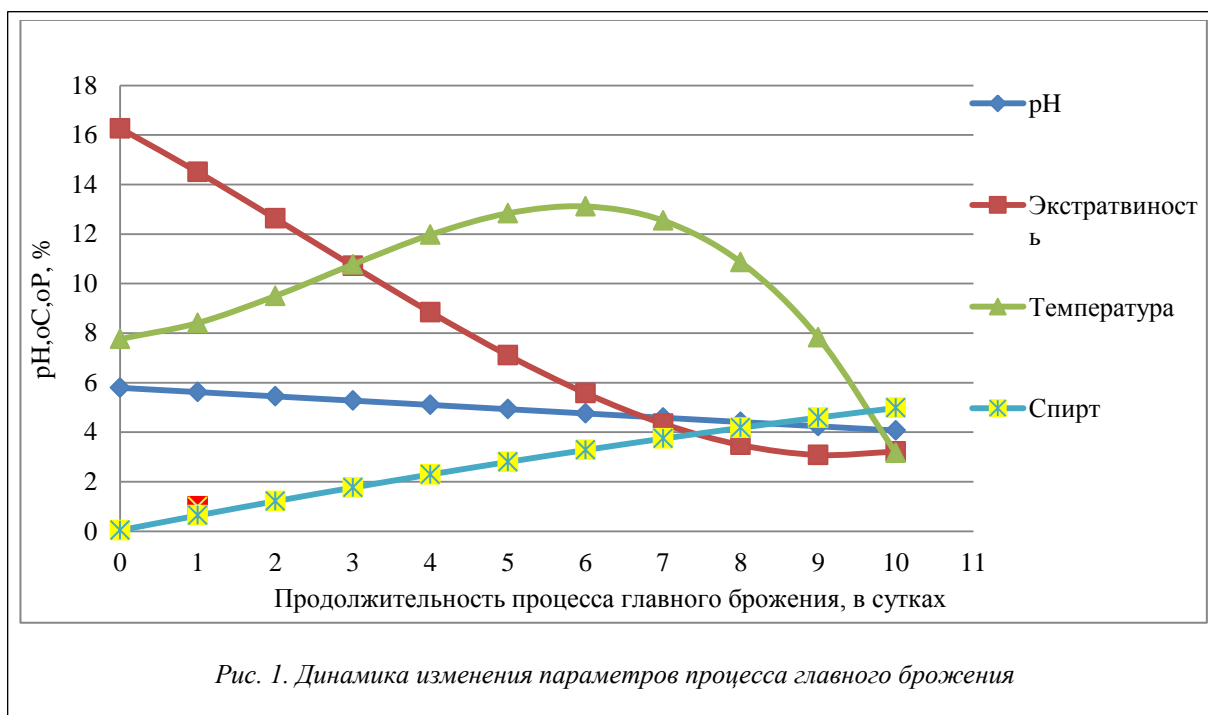
К характеристикам многопараметрических процессов относятся также наличие большого числа входных и выходных измеряемых параметров (ММО – multiple-input multiple-output – много входов и много выходов) [3, 4].

Понятие «технологический процесс» в дальнейшем будет использоваться в широком смысле и включать как непосредственные процессы производства определенного продукта, так и процессы обеспечения нормального функционирования. Такое представление дает возможность с единой точки зрения подойти к решению задачи управления технологическим процессом производства определенного продукта в целом и задач управления отдельными технологическими агрегатами.

Управление многопараметрическим технологическим процессом понимается как процесс, для которого определены входные контролируемые воздействия, установлены зависимости между входными воздействиями и выходными параметрами, разработаны методы автоматического измерения входных воздействий и выходных параметров и методы управления процессом [1].

Целью управления многопараметрическими технологическими процессами является достижение требуемых значений его параметров при наличии ограничений на динамику их изменения.

Многопараметрический технологический процесс главного брожения характеризуется множеством параметров, основными из которых будем считать температуру  $T_0$ , экстрактивность  $E$ , водородный показатель  $pH$ , содержание спирта  $C$ . Динамика их изменения в ходе неуправляемого процесса главного брожения пива (при низовом брожении) показана на рисунке 1.



Аналитические зависимости их изменения следующие:

$$\begin{cases} -0,043t^3 + 0,35t^2 + 0,34t + 7,765 \leq 4, \\ -0,1725t + 5,793 \leq 4,3, \\ 0,0137t^3 - 0,1t^2 - 1,675t + 16,269 \leq 2,5, \\ -0,0116t^2 + 0,61t + 0,04 = 4,5, \end{cases} \quad (1)$$

где  $t \geq 0$ .

Из приведенных параметров управляющим может быть только температура. Тогда для управления технологическим процессом главного брожения пива необходимо знать закон изменения температуры в ходе его протекания.

Целью оптимального управления многопараметрическим технологическим процессом главного брожения пива является минимизация продолжительности данного процесса при имеющихся ограничениях на его другие параметры.

Прогнозирование оптимальной продолжительности многопараметрического технологического процесса главного брожения пива на основе фильтра Калмана рассмотрено в работе [5]. Схема автоматизированной системы управления многопараметрическим технологическим процессом главного брожения пива представлена на рисунке 2, где ИМ – исполнительные механизмы; ОУ – объект управления; ВВ – возмущающее воздействие;  $Q_p$  – количество продукта;  $Q_{пп}$  – количества побочных продуктов;  $D_E$  – датчик экстрактивности;  $D_{pH}$  – датчик водородного показателя;  $D_C$  – датчик спирта;  $D_T$  – датчик температуры.

Автоматизированная система управления многопараметрическим технологическим процессом состоит из следующих основных элементов.

ИМ предназначен для нагрева или охлаждения объекта управления, например пивного сула. Он состоит из следующих основных устройств: вентилятор, хладагент, обогреватель.

ОУ – емкость (чаще всего *цилиндро-канонический танк* (ЦКТ)), в которой происходит процесс главного брожения пива.

Датчики – технологическое оборудование для сбора информации о свойствах готовящегося продукта: термометры, манометры, сахарометры, спиртометры и т.д.

Важнейшим элементом системы управления является регулятор управляющего воздействия (далее – регулятор). Регулятор служит для обеспечения определенного качества параметров технологического

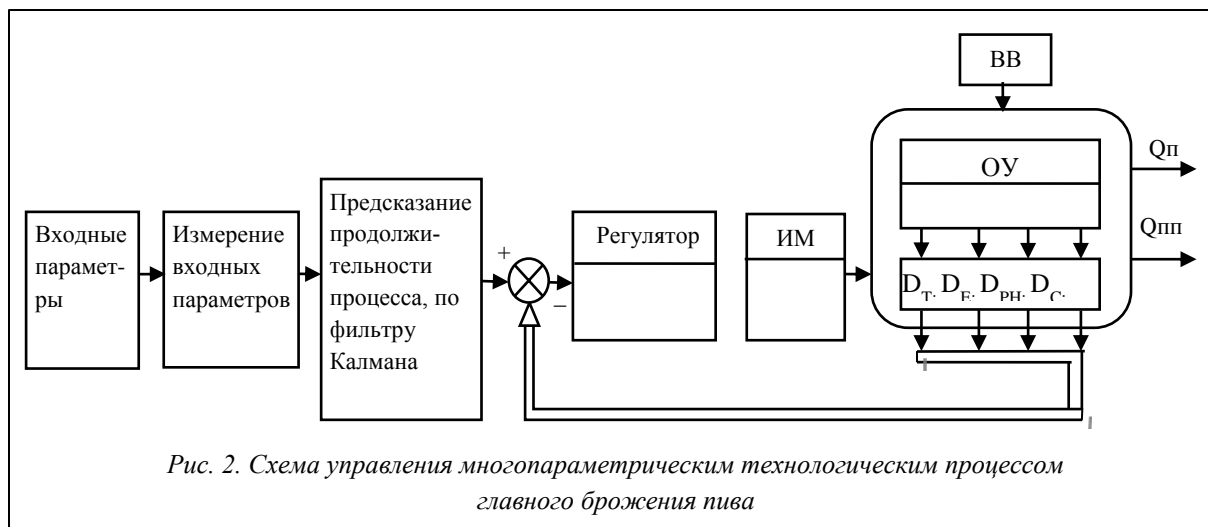


Рис. 2. Схема управления многопараметрическим технологическим процессом главного брожения пива

процесса на требуемом уровне. Он работает непосредственно с исполнительным механизмом. Известны следующие виды регуляторов: интегральный (И-регулятор), пропорциональный (П-регулятор), пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор), пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования (ПИД-регулятор).

### Обоснование выбора регулятора и закона регулирования

В многопараметрическом технологическом процессе главного брожения пива можно выделить два основных подпроцесса (этапа): нагревание и охлаждение.

Первый заключается в нагревании (за счет размножения дрожжей или за счет воздействия ИМ) объекта управления (продукта) на 5,5–6 °С в течение 3–5 дней. По виду переходных характеристик процесса различают статический технологический процесс (рис. 3) и астатический технологический процесс (рис. 4) [6].

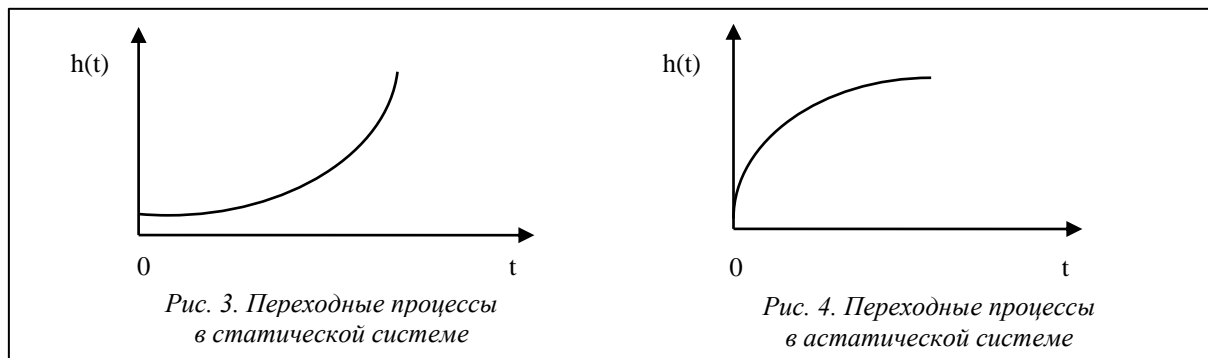


Рис. 3. Переходные процессы в статической системе

Рис. 4. Переходные процессы в астатической системе

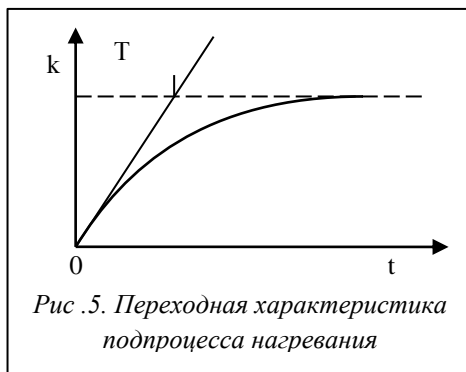


Рис. 5. Переходная характеристика подпроцесса нагревания

Анализ графика изменения температуры во времени (рис. 1) позволяет сделать вывод, что многопараметрический технологический процесс главного брожения пива является статическим процессом. Переходная функция  $h(t)$  процесса имеет форму, показанную на рисунке 5 [6].

Тогда передаточная функция процесса (отношение изображения выходной величины к изображению входной величины при нулевых начальных условиях) имеет следующий вид [7]:

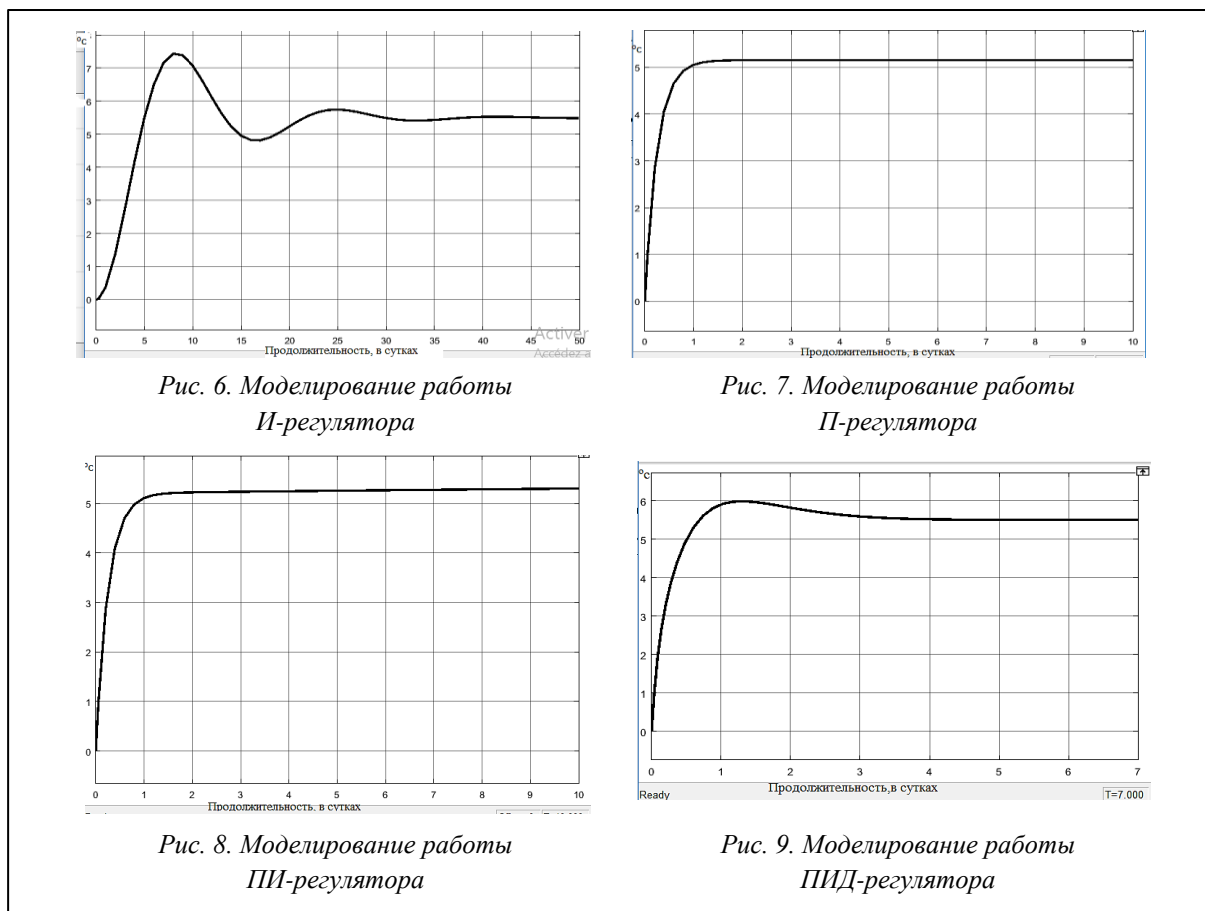
$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}, \tag{2}$$

где  $k$  – коэффициент передачи (отношение изображения выходной величины к изображению входной величины при нулевых начальных условиях);  $Tp$  – постоянная времени процесса.

В соответствии с формулой (2) с учетом результатов анализа рисунка 1 передаточная функция подпроцесса нагревания будет иметь вид

$$W(p) = \frac{5,5}{4p+1} \tag{3}$$

Результаты моделирования работы регуляторов (И, П, ПИ, ПИД) в ходе подпроцесса нагревания приведены на рисунках 6–9.



При использовании И-регулятора процесс достигает установившегося значения температуры на 35-й день. Это очень долго. При применении П- и ПИ-регулятора процесс нагревания быстро начинается (в первый день температура достигает 5 °С). Это испортит продукт – пиво. При применении этих регуляторов процесс не достигает максимального значения температуры (13,5 °С). Применение ПИД-регулятора позволяет достигать установившегося значения температуры на третий день. Тогда можно сделать вывод, что для создания автоматизированной системы управления применительно к подпроцессу нагревания наиболее целесообразно применять ПИД-регулятор.

Блок-схема ПИД-регулятора подпроцесса нагревания показана на рисунке 10, а результат моделирования – на рисунке 9.

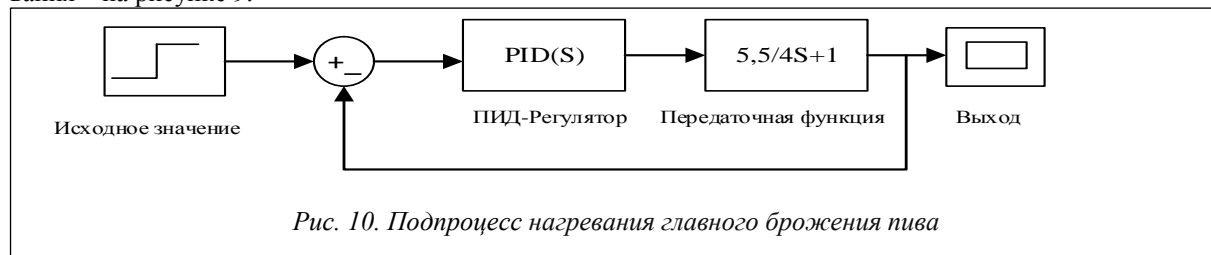


Рис. 10. Подпроцесс нагревания главного брожения пива

Второй подпроцесс заключается в охлаждении объекта управления с 13,5 °С до ≤4 °С (то есть на 9,5 °С) за 2 дня. Переходная характеристика имеет вид, показанный на рисунке 11, где  $k$  – коэффициент передачи, а  $T$  – постоянная времени объекта.

В соответствии с формулой (2) и с учетом результатов анализа (рис. 1) передаточная функция подпроцесса охлаждения будет иметь вид:

$$W(p) = \frac{9,5}{2p+1} \tag{4}$$

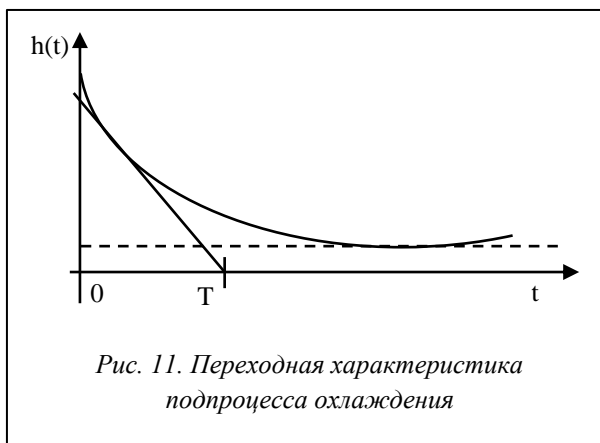


Рис. 11. Переходная характеристика подпроцесса охлаждения

Результаты моделирования работы регуляторов (И, П, ПИ, ПИД) в ходе подпроцесса охлаждения приведены на рисунках 12–15.

При использовании И-регулятора процесс достигает установившегося значения температуры на 20 дней. При применении П-регулятора процесс не достигает минимального значения (-9,5 °С). При применении ПИ-регулятора процесс продолжается дольше и достигает минимального значения на третий день. При применении ПИД-регулятора установившееся значение температуры достигается за 1,5 дня. Можно сделать вывод, что для автоматизированной системы управления на этапе подпроцесса охлаждения предпочтительнее применение ПИД-регулятора.

Блок-схема ПИД-регулятора подпроцесса охлаждения показана на рисунке 16. Результат моделирования показан на рисунке 15.

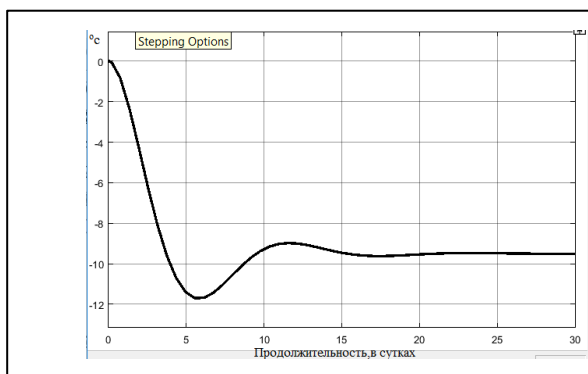


Рис. 12. Моделирование работы И-регулятора

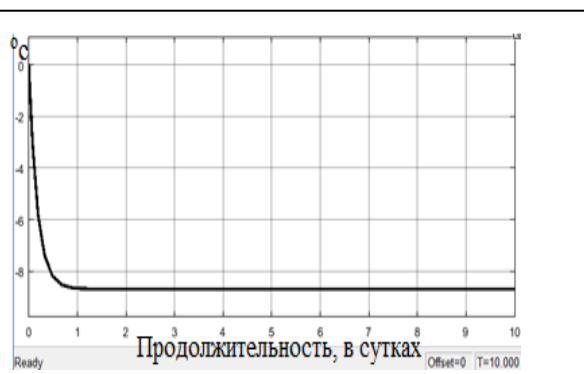


Рис. 13. Моделирование работы П-регулятора

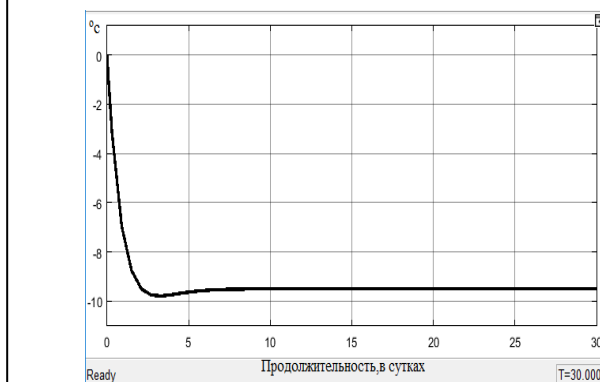


Рис. 14. Моделирование работы ПИ-регулятора

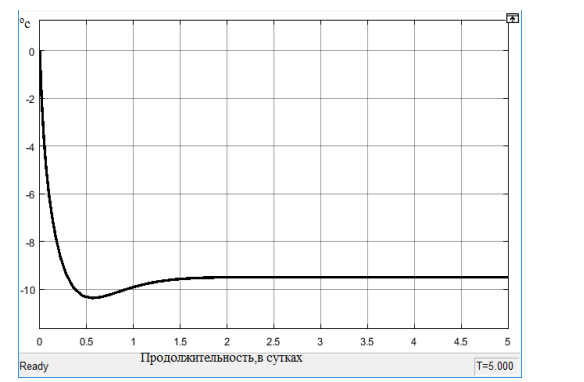


Рис. 15. Моделирование работы ПИД-регулятора

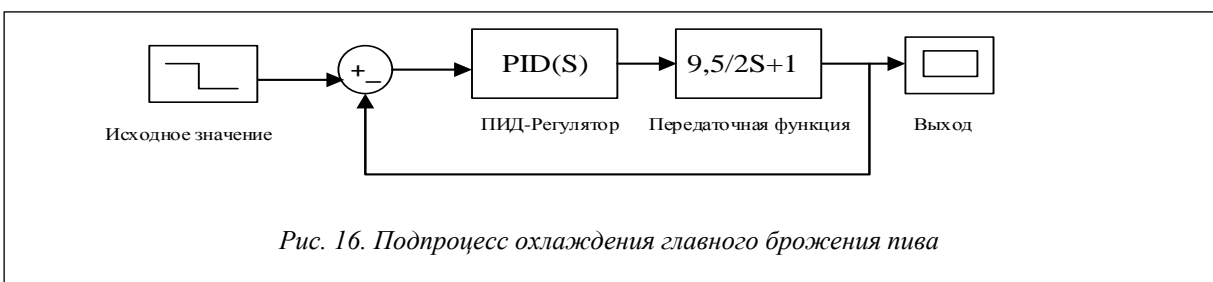


Рис. 16. Подпроцесс охлаждения главного брожения пива

ПИД-регулятор относится к наиболее распространенному типу регуляторов. Порядка 90–95 % регуляторов, находящихся в настоящее время в эксплуатации, используют ПИД-алгоритм. Причинами столь высокой популярности являются простота построения и промышленного использования, надежность функционирования, пригодность для решения большинства практических задач и низкая стоимость [8].

В процессе моделирования получены значения параметров регулятора, обеспечивающие наиболее эффективное решение задач управления (табл. 1).

Таблица 1

## Значения параметров регулятора

Название коэффициента	Значение коэффициента для подпроцесса «нагревание»	Значение коэффициента для подпроцесса «охлаждение»
Пропорциональная часть, $K$	2, 2432	1, 75
Постоянная интегрирования, $T_i$	0,12153	3,98
Постоянная дифференцирования, $T_d$	-0,03532	0,043
Коэффициент фильтра, $N$	0,9452	24,1

Показатели качества управления многопараметрическим технологическим процессом главного брожения, определяемые по переходной характеристике, показаны в таблице 2.

Таблица 2

## Показатели качества управления

Название показателя	Подпроцесс «нагревание»	Подпроцесс «охлаждение»
Установившееся значение выходной величины, $Y_{уст}$	5,5	9,5
Колебательность процесса $\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} \cdot 100\%$	$\psi = \frac{0,5 - 0}{0,5} \cdot 100\% = 100\%$	$\psi = \frac{1 - 0}{1} \cdot 100\% = 100\%$
Время достижения первого максимума, $T_{max}$	$T_{max} = 1,25$ дня	$T_{max} = 0,6$ дня
Время регулирования, $T_p$	$T_p = 3,5$ дня	$T_p = 2$ дня
Максимальное перерегулирование $\sigma_{max} = \frac{h_{max1} - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\%$	$\sigma_{max} = \frac{6 - 5,5}{5,5} \cdot 100\% = 9\%$	$\sigma_{max} = \frac{10,5 - 9,5}{9,5} \cdot 100\% = 10\%$
Динамический коэффициент регулирования, $R_d$	$R_d = \frac{12,5}{13,5} \cdot 100\% = 92,5\%$	$R_d = \frac{9}{9,5} \cdot 100\% = 94,7\%$
Максимальное динамическое отклонение, $\Delta_{удин}$	$\Delta_{удин} = y_{max-y};$ $6 - 5,5 = 0,5$	$\Delta_{удин} = y_{max-y} = 10,5 - 9,5 = 1$

Алгоритм регулирования температуры в процессе главного брожения пива показан на рисунке 17.

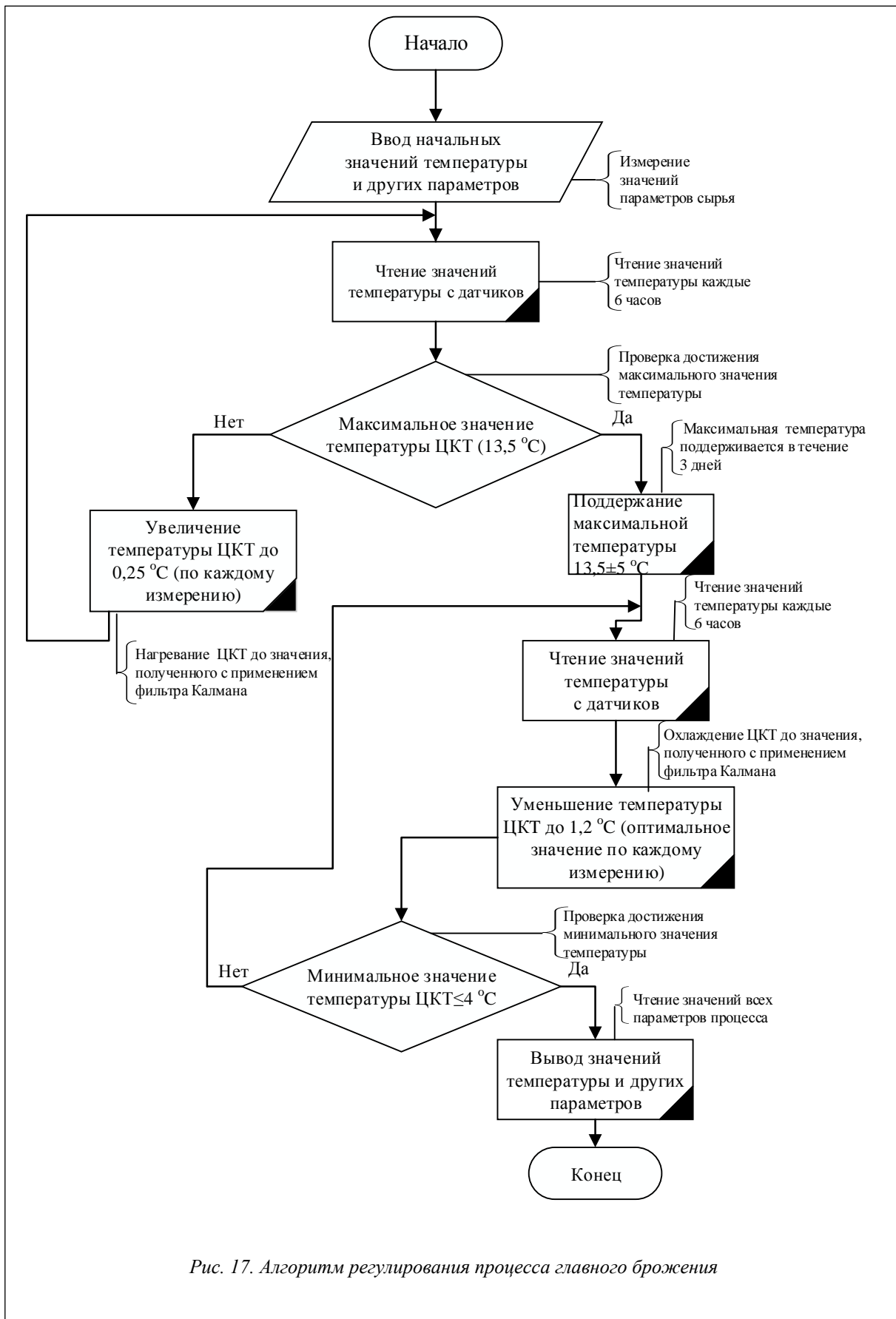


Рис. 17. Алгоритм регулирования процесса главного брожения

## Вывод

Математическое моделирование работы регулятора при управлении многопараметрическим технологическим процессом на примере процесса главного брожения пива, полученные при этом результаты (настройки) позволяют считать, что предложенный в работе к использованию ПИД-регулятор обеспечит решение задач управления многопараметрическим технологическим процессом с требуемыми характеристиками.

## Литература

1. Скворцов В.Ф. Основы технологии машиностроения: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнич. ун-та, 2012. 352 с.
2. Грибкова А.Н. Развитие методов анализа и синтеза оптимального управления для построения информационно-управляющих систем многомерными технологическими объектами. Тамбов, 2016. 32 с.
3. Левин С.В. Оптимальное управление линейными MISO-объектами с применением методов линейного программирования. Харьков: Национальн. аэрокосмич. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2008.
4. Грибков А.Н., Куркин И.А. Метод структурного синтеза алгоритма расчета параметров функций оптимального управления многомерным объектом // Информатика и системы управления. 2015. № 3 (45). С. 72–83.
5. Нийонсаба Т., Павлов В.А. Прогнозирование оптимальной длительности процесса главного брожения пива на основе фильтра Калмана // Программные продукты и системы. 2016. № 3. С. 202–207.
6. Сенигов П.Н. Теория автоматического управления: конспект лекций. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. 93 с.
7. Муромцев Ю.Л., Муромцев Д.Ю. Основы автоматики и системы автоматического управления. Тамбов: Изд-во Тамбовского гос. техн. ун-та, 2008. Ч. 1. С. 96–100.
8. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66–74.