

Автор ер.
с 59

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ им. М.В. ЛОМОНОСОВА

СОКОЛОВ В. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОПОТОЧНОЙ
БРОДИЛЬНОЙ БАТАРЕИ КАК ОБЪЕКТА
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗА-
ЦИИ ПРОЦЕССА СПИРТОВОГО БРОЖЕ-
НИЯ МЕЛАССЫ

(Специальность № 198 - Автоматизация производ-
ственных процессов пищевой промышленности)

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Деп. уч. 13.87

Одесса, 1970

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ им. М.В. ЛОМОНОСОВА

СОКОЛОВ В. А.

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОПОТОЧНОЙ
БРОДИЛЬНОЙ БАТАРЕИ КАК ОБЪЕКТА
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗА-
ЦИИ ПРОЦЕССА СПИРТОВОГО БРОЖЕ-
НИЯ МЕЛАССЫ

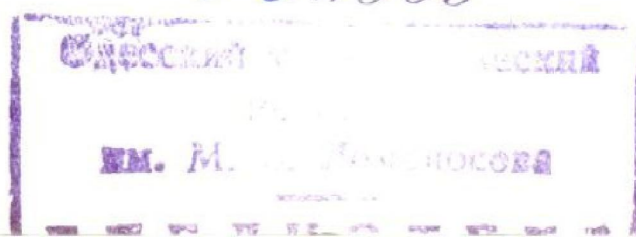
(Специальность № 198 - Автоматизация производ-
ственных процессов пищевой промышленности)

Автореферат

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Одесса, 1970

V 011506



Работа выполнена во Всесоюзном проектно-конструкторском и научно-исследовательском институте автоматизации пищевой промышленности "Пищепромавтоматика".

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор *П. Н. Платонов*

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор *В. Л. Яровенко*,
кандидат технических наук, доцент *В. А. Долгозяк*.

Ведущее предприятие - Барский спирто-дрожжевой комбинат.

Автореферат разослан " ____ " _____ 1970 г.

Защита диссертации состоится " 30 " X 1970 г.
на заседании Совета Одесского технологического института имени М.В. Ломоносова. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Ваши отзывы в двух экземплярах направлять по адресу: г. Одесса-39, ул. Свердлова, 112, Технологический институт имени М.В. Ломоносова.

Ученый секретарь совета

(*Л. А. Запорожец*)

В В Е Д Е Н И Е

Отечественная спиртовая промышленность вносит значительный вклад в производство товаров широкого потребления. В процессе производства спирта в качестве побочных продуктов получают сивушные масла, эфиры и альдегиды, хлебопекарные и кормовые дрожжи, кормовой концентрированный витамин В₁₂, глицерин, бетаин, глутаминовую кислоту, биомидин, углекислоту и другие продукты.

Основная задача, стоящая перед работниками спиртовой промышленности - интенсификация процесса производства с целью получения максимального выхода готовой продукции высокого качества при ограниченных затратах. В условиях происходящей научно-технической революции эта задача не может быть решена без широкого внедрения в спиртовую промышленность автоматизации технологических процессов.

Спиртовое производство в Советском Союзе в результате непрерывного технического прогресса достигло мирового уровня, а по ряду показателей превзошло наиболее развитые капиталистические страны. Впервые непрерывное брожение было внедрено на спиртовых заводах СССР. Оно получило широкое распространение на всех заводах, перерабатывающих мелассу, и на многих заводах, перерабатывающих крахмалистое сырье.

В настоящее время все спиртовые заводы, использующие методы комплексной переработки сырья, работают по однопоточной схеме брожения. Производство хлебопекарных дрожжей на них составляет более 20% общего объема производства в стране и в ближайшие годы должно увеличиться. Поэтому исследование и решение задач автоматизации од-

нопоточного процесса брожения, особенно в случае двухпродуктового производства (спирт, хлебопекарные дрожжи), приобретает особую актуальность.

В ходе разносторонних научных исследований процессов брожения получены плодотворные теоретические и практические результаты. Теоретические основы непрерывного спиртового брожения изложены в работах С.В. Лебедева и в дальнейшем развиты Д.Н. Климовским, Л.И. Ясинским, В.Л. Яровенко и др. Большой вклад в развитие промышленных способов непрерывного спиртового брожения внесли ученые Всесоюзного научно-исследовательского института продуктов брожения и Украинского научно-исследовательского института спиртовой и ликеро-водочной промышленности.

Несмотря на достигнутые результаты, вопросы автоматизации процессов брожения не решены с достаточной полнотой. До последнего времени не исследована однопоточная бродильная батарея как объект автоматического управления, отсутствовали данные, характеризующие ее статические и динамические свойства и функции ее эффективности. Это исключало возможность как рационального решения задач автоматизации процесса спиртового брожения, так и применения современных методов управления производством, что вело к снижению качества и к дополнительным производственным потерям.

Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию и разработке эффективных методов управления ферментативным процессом спиртового брожения мелассы в непрерывной однопоточной батарее. Цель исследования — на основе теоретического и экспериментального изучения объекта разработать систему автоматического управления, которая обеспечила бы получение наилучших экономических показателей совместного производства спирта и хлебопекарных дрожжей.

Методологической основой проведенного исследования послужили работы Е.Г. Дудникова, В.В. Кафарова, Б.Н. Петрова, В.В. Солодовникова, В.А. Трапезникова и др.

В работе реализован экономический подход к созданию системы управления. Законы регулирования по основным каналам выявлены на базе исследования статических и динамических свойств аппаратов. Общая структура схемы определена на основе анализа построенной по специально разработанной методике экономико-математической модели процесса. При разработке экономико-математической модели проведены специальные экспериментальные исследования. По результатам исследований получено математическое описание взаимосвязи удельной скорости роста биомассы дрожжей с основными управляющими воздействиями, что представляет самостоятельный теоретический и практический интерес.

Предложена рациональная и принципиально новая система автоматического управления процессом брожения, обеспечивающая реализацию выбранного экономического критерия. Система успешно внедрена в производственную эксплуатацию на Барском спирто-дрожжевом комбинате и рекомендована к распространению в промышленности.

Диссертация изложена в четырех главах, содержит 168 страниц текста, 24 таблицы, 37 рисунков и приложения.

1. ПОДГОТОВЛЕННОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА К АВТОМАТИЗАЦИИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В первой главе проводится анализ основных данных, характеризующих однопоточную бродильную батарею как объект автоматического управления. На базе обзора работ в области исследования основных закономерностей непрерывных процессов культивирования дрожжей и брожения, а также опыта автоматизации сформулированы технологические требования и дана постановка задачи исследования.

Все непрерывные технологические схемы, получившие распространение на спиртовых заводах, перерабатывающих мелассу, можно подразделить на две основные группы: однопоточные и двухпоточные.

Ряд преимуществ, основными из которых являются: возможность получения хлебопекарных дрожжей необходимого качества, простота аппаратного оформления, упрощение обслуживания и создание благоприятных условий для автоматизации процесса — обусловили распространение однопоточных схем брожения на всех спиртовых заводах комплексной переработки сырья.

Двухпоточные схемы требуют применения сула двух концентраций, что существенно усложняет процесс. Кроме того, остаточные спиртовые дрожжи не могут быть использованы в качестве хлебопекарных дрожжей.

В непрерывной однопоточной бродильной батарее процесс брожения практически разделяется на две фазы: в первой происходит преимущественно размножение дрожжевых клеток, во второй — энергичное образование спирта.

Процесс культивирования дрожжей характеризуется удельной скоростью роста дрожжей μ , определяющей прирост дрожжей в единицу времени, а унос дрожжей зависит от скорости разбавления D , равной v_p/v , где v_p — приток рассиропки, а v — объем дрожжегенератора.

Кинетика роста дрожжей обусловлена многочисленными факторами. На развитие дрожжей и брожение существенное влияние оказывают начальная концентрация сахаров (концентрация сухих веществ рассиропки мелассы), скорость потока субстрата, кислотность среды, содержание спирта, температура и другие физические и химические параметры.

Стационарный процесс дрожжегенерации наступает при равенстве $\mu = D$, накопление биомассы дрожжей происходит при $\mu > D$, а их вымывание — при $\mu < D$.

Однопоточная бродильная батарея состоит из рассиропника и ряда бродильных аппаратов, соединенных последовательно. В первых бродильных аппаратах, служащих в качестве дрожжегенераторов, при продувании воздуха происходит интенсивное размножение дрожжей. В остальных бродильных аппаратах основная масса сахара сбраживается в спирт и бражка непрерывно поступает на сепарацию для выделения дрожжей и затем на перегонку.

Анализ технических данных показал, что однопоточная бродильная батарея в значительной мере подготовлена к автоматизации, так как несмотря на сложность системы контроля непрерывного процесса брожения, преимуществом его является однородность и непрерывность, создающие благоприятные условия для разработки системы автоматического управления.

Как объект исследования однопоточный процесс брожения может быть представлен в виде трех самостоятельных участков:

- а) подготовка рассиропки мелассы в рассиропнике;
- б) культивирование дрожжей в дрожжегенераторах с образованием некоторого количества спирта;
- в) сбраживание сахара в бродильных аппаратах.

Накопление спирта и биомассы дрожжей осуществляется в процессе брожения по мере перетока суслу от аппарата к аппарату. Конечный продукт однопоточной батареи — зрелая бражка содержит 7–9% об. спирта и 12–18 кг дрожжей в 1 м³ бражки. Численные значения указанных величин и количество зрелой бражки тесно взаимосвязаны и являются результатом происходящего в бродильной батарее процесса брожения.

В процессе производства постоянно возникает альтернативная задача отыскания технологического режима брожения, обеспечивающего образование таких концентраций дрожжей и спирта в зрелой бражке, которые позволяют достигнуть максимальной суммарной прибыли двухпродуктового производства.

При этом должны быть обеспечены плановые показатели производства, являющиеся в данном случае ограничениями.

Система автоматизации процесса спиртового брожения мелассы в непрерывной однопоточной батарее должна обеспечить решение указанных задач, а также удовлетворять требованиям, которые можно разделить на две категории.

К первой категории относятся технологические требования к точности систем автоматического регулирования параметров, обеспечивающих такие режимы работы, которые не приводят к потерям спирта на единицу перерабатываемого сырья выше нормативной величины. Для учета этих требований при решении задачи автоматизации, в работе определены количественные оценки допустимых абсолютных погрешностей измерения и допустимые величины ошибок регулирования основных технологических параметров.

Требования второй категории к системе автоматизации определяются выбранным критерием автоматического управления и условиями его экстремизации. Они определяют допустимые отклонения режимных параметров от значений, рекомендуемых экономико-математической моделью процесса, и позволяют качественно и количественно оценить степень влияния основных регулируемых параметров

процесса брожения на технико-экономические показатели производства, а также определить, в зависимости от складывающейся производственной ситуации, оптимальный для выбранного экономического критерия технологический режим работы батарей.

Высказанные положения определили нижеследующие основные задачи исследования однопоточной бродильной батареи.

1. Идентификация объектов регулирования (исследование их статических и динамических характеристик).
2. Разработка и исследование экономико-математической модели процесса брожения в однопоточной батарее.
3. Разработка системы автоматизации процесса брожения в однопоточной батарее.
4. Внедрение разработанной системы автоматизации и проверка результатов исследований в производственных условиях.

II. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЕНЬЕВ ОБЪЕКТА

Во второй главе приведены данные экспериментальных исследований кинетики процесса брожения и зависимости удельной скорости роста дрожжей от основных регулируемых параметров процесса брожения, а также статические и динамические характеристики рассиропника и дрожжегенератора. На базе анализа экспериментальных данных определены основные объекты регулирования как звенья общей системы автоматического управления и выявлена природа их взаимосвязи.

Бродильная батарея представляет собой сложный динамический объект. Динамические свойства бродильных аппаратов зависят от кинетики происходящей реакции, физических констант среды, геометрической формы аппаратов и других факторов.

Объектом исследования выбрана однопоточная бродильная батарея Барского спирто-дрожжевого комбината мощностью до 8500 дал спирта и до 20 тонн хлебопекарных дрожжей в сутки, включающая рассиропник, дрожжегенера-

торы и бродильные аппараты. Все аппараты исследуемого объекта соединены в технологическую цепочку, причем незначительность влияния последующих аппаратов на режим предыдущих позволяет рассматривать каждый из аппаратов как объект, обладающий детектируемыми свойствами.

На базе применения методов "пассивного" эксперимента и корреляционного анализа изучен характер изменения параметров в режиме ручного управления.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы.

1. При ручном регулировании режима технологический процесс протекает при значительных и резких колебаниях выходных параметров каждого звена (концентрации сахара в субстрате, концентрации дрожжевых клеток и концентрации спирта), вызываемых нестабильностью входных и возмущающих параметров (концентрации и расхода рассиропки, температуры субстрата, расхода воздуха и др.).

2. Наиболее чувствительна к возмущениям концентрация сахара (сухих веществ) в субстрате.

3. Значительные и резкие изменения концентрации сухих веществ субстрата свидетельствуют о том, что кинетика процесса непрерывно меняется, вызывая колебания производительности.

4. Из входных параметров наиболее существенное влияние на интенсивность процесса оказывают концентрация и расход рассиропки.

5. Динамические свойства бродильных аппаратов и батарей в целом обусловлены, в основном, кинетикой биохимической реакции, так как процесс брожения протекает медленно и постоянная времени перемешивания невелика.

6. Время оборота бродильной батареи составляет около 24 часов.

Бродильная батарея как объект управления характеризуется большой емкостью, что существенно затрудняет возможность охвата ее обратной связью.

Поэтому оказалось целесообразным прибегнуть к общепринятому в таких случаях методу — управлению про-

цессом в головной части с контролем выходных параметров батарей по результатам экспрессанализов.

В работе показано, что управление процессом брожения можно осуществлять по концентрации сухих веществ в субстрате.

Реализация такого управления требует исследования головных аппаратов бродильной батареи как объектов автоматического регулирования. Такими аппаратами являются рассиропник и дрожжегенераторы (головные бродильные аппараты). Это определило направление и объем дальнейших исследований.

Исследование статистики и динамики рассиропника

Рассиропник представляет собой смеситель для получения мелассного сусла-рассиропки. Подготовленная меласса в концентрации 60-70% с.в. поступает в рассиропник из напорного бака. Теплая вода, необходимая для получения рассиропки заданной концентрации и температуры, приготавливается в смесителе.

Параметры, характеризующие рассиропник как объект автоматического управления, условно разделены на следующие основные группы:

1) регулирующие воздействия — расход мелассы G_M , соотношение расходов "вода — меласса" $\frac{G_M}{G_B}$, температура теплой воды θ_B ;

2) регулируемые параметры — концентрация сахара (сухих веществ) в рассиропке X_p , температура рассиропки θ_p , расход рассиропки G_p ;

3) основные возмущающие воздействия — концентрация сахара (сухих веществ) в мелассе X_M , температура мелассы θ_M .

При составлении уравнений статистики и динамики приняты следующие допущения:

1. Рассиропник представляет собой объект идеального перемешивания со сосредоточенными параметрами; постоянные времени по всем каналам одинаковы.

2. Потерями тепла в окружающую среду можно пренебречь.

3. Концентрация рассиропки не зависит от температуры (в рабочем диапазоне температур).

Система уравнений статики рассиропника определена аналитически на базе уравнений материального и теплового балансов. Полученные выражения для статических характеристик по следующим каналам: изменение соотношения расходов "вода - меласса" - изменение концентрации сахара в рассиропке ($\frac{G_B}{G_M} \rightarrow \delta_p$); изменение температуры теплой воды - изменение температуры рассиропки ($\Theta_B \rightarrow \Theta_p$), - соответственно могут быть записаны так:

$$\delta_p = \frac{G_M \cdot \delta_M}{G_p} = \frac{\delta_M}{1 + \frac{G_B}{G_M}}; \quad (1)$$

$$\Theta_p = \frac{G_B}{1 + \frac{G_M}{G_B}} \cdot \frac{C_B}{C_p} + \frac{G_M}{1 + \frac{G_B}{G_M}} \cdot \frac{C_M}{C_p}, \quad (2)$$

где C_B, C_M, C_p - удельные теплоемкости соответственно воды, мелассы и рассиропки, ккал/кг.град.

Математическая модель динамики рассиропника по каналам: $G_M \rightarrow G_p; G_M \rightarrow \delta_p; G_B \rightarrow \delta_p; \delta_M \rightarrow \delta_p;$
 $G_M \rightarrow \Theta_p; G_B \rightarrow \Theta_p; \Theta_M \rightarrow \Theta_p; \frac{G_B}{G_M} \rightarrow \delta_p; \frac{G_B}{G_M} \rightarrow \Theta_p;$
 $G_B \rightarrow G_p; \Theta_B \rightarrow \Theta_p$

представлена системой дифференциальных в операторной форме и алгебраических уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} (T_p + 1) \delta_p = K_1 G_M \cdot (t - \tau_1) \\ (T_p + 1) \delta_p = K_2 G_B \cdot (t - \tau_2) \\ (T_p + 1) \delta_p = K_3 \delta_M (t - \tau_3) \\ (T_p + 1) \Theta_p = K_6 G_M (t - \tau_6) \\ G_p = K_4 G_M \\ G_p = K_5 G_B \\ \\ (T_p + 1) \Theta_p = K_7 G_B \cdot (t - \tau_7) \\ (T_p + 1) \Theta_p = K_8 \Theta_B \cdot (t - \tau_8) \\ (T_p + 1) \Theta_p = K_9 \Theta_M \cdot (t - \tau_9) \\ (T_p + 1) \delta_p = K_{10} \frac{G_B}{G_M} \cdot (t - \tau_{10}) \\ (T_p + 1) \Theta_p = K_{11} \frac{G_B}{G_M} \cdot (t - \tau_{11}) \end{array} \right. \quad (3)$$

где T - постоянная времени;
 $K_1 \div K_{11}$ - коэффициенты усиления по соответствующим каналам регулирования;
 P - оператор дифференцирования;
 τ_j - запаздывание.

Значение коэффициентов усиления $K_1 \div K_{11}$ определены аналитически из выражений (1) и (2) и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Численные значения коэффициентов усиления

№ звена	Канал	Расчетная формула коэффициента усиления	Значения коэффициента усиления	Размерность
1	$G_M \rightarrow \gamma_P$	$K_1 = \frac{\delta_M - \delta_P}{G_P}$	1 + 1,6	% с.в. м ³
2	$G_B \rightarrow \delta_P$	$K_2 = -\frac{\delta_P}{G_P}$	-(0,32+0,55)	"
3	$\delta_M \rightarrow \delta_P$	$K_3 = \frac{G_M}{G_P}$	0,25 + 0,4	
4	$G_M \rightarrow G_P$	$K_4 = 1$	1	
5	$G_B \rightarrow G_P$	$K_5 = 1$	1	
6	$G_M \rightarrow \theta_P$	$K_6 = \frac{\theta_M - \theta_P}{G_P}$	0,04 + 0,25	°С м ³
7	$G_B \rightarrow \theta_P$	$K_7 = -\frac{\theta_B - \theta_P}{G_P}$	-(0,1+0,2)	"
8	$\theta_B \rightarrow \theta_P$	$K_8 = \frac{G_B}{G_P}$	0,6 + 0,8	
9	$\theta_M \rightarrow \theta_P$	$K_9 = \frac{G_M}{G_P}$	0,2 + 0,4	
10	$\frac{G_B}{G_M} \rightarrow \gamma_P$	$K_{10} = -\frac{\gamma_P}{1 + \frac{G_B}{G_M}}$	-(3,2 + 5,5)	% с.в.
11	$\frac{G_B}{G_M} \rightarrow \theta_P$	$K_{11} = \frac{\theta_P - \theta_B}{1 + \frac{G_B}{G_M}}$	0,4 + 0,5	% с.в.

Учитывая, что постоянная времени в передаточных функциях по всем каналам одинакова, и принимая во внимание численные значения коэффициентов усиления, выбраны следующие каналы регулирования:

1. Изменение соотношения расходов "вода - меласса" - изменение концентрации сахара в рассиропке.

2. Изменение температуры теплой воды - изменение температуры рассиропки.

Адекватность полученных моделей реальным характеристикам рассиропника по выбранным каналам регулирования определена экспериментально методом кривых разгона. Полученные экспериментальные данные достаточно хорошо совпали с расчетными. Таким образом, усредненные значения динамических параметров рассиропника равны соответственно:

1. По каналу изменение температуры воды - изменение рассиропки мелассы - $T_8 = 0,12$ мин., $\tau_8 = 0,06$ мин.,

$$K_8 = 0,7 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \tau}{\text{м}^3}.$$

2. По каналу изменение соотношения расходов "вода - меласса" - изменение концентрации сахара в рассиропке мелассы - $T_{10} = 0,12$ мин., $\tau_{10} = 0,065$ мин., $K'_{10} = 4,3\%$ с.в.

Полученные данные исследований послужили основой для расчета и разработки системы автоматизации рассиропника.

Исследование статики и динамики дрожжегенератора

В дрожжегенераторе происходит процесс образования дрожжей и подбраживания суслу. Основная задача процесса - получение возможно большего количества активных дрожжей с тем, чтобы обеспечить в бродильных аппаратах оптимальные условия процесса брожения с выделением спирта.

На процесс культивирования дрожжей воздействуют возмущения как внешние, так и внутренние. К внешним возмущениям относятся: концентрация, температура, pH и кислотность рассиропки мелассы, расход воздуха на аэрацию, количество и качество питательных веществ в рассиропке; к внутренним – температура брожения, раса дрожжей, инфицированность мелассы и соответственно рассиропки и другие факторы.

Однако, для целей управления процессом достаточно выяснить влияние основных внешних и внутренних возмущений на регулируемые параметры и найти возможность их компенсации имеющимися управляющими воздействиями.

В соответствии с параметрической схемой объекта, основные переменные величины, характеризующие дрожжегенератор как объект автоматизации, условно разделены на следующие группы:

- 1) регулируемые параметры – концентрация сахара (сухих веществ) бродящего субстрата δ ;
- 2) регулирующие воздействия – расход рассиропки мелассы G_p , расход охлаждающей воды G_B ;
- 3) основные возмущающие воздействия – концентрация рассиропки мелассы δ_p , температура бродящего субстрата θ , температура рассиропки θ_p , расход воздуха $G_{воз}$, реакция среды рассиропки pH_p , содержание сахара в мелассе S .

Существующая связь между δ и $G_p, G_{воз}, \delta_p, \theta_p, \theta, pH_p, S$ может быть выражена в статике системой сложных и нелинейных уравнений. Однако опыт эксплуатации и результаты ряда исследований дают основания полагать, что в области рабочих режимов эта связь может быть линеаризована.

Проведенные экспериментальные исследования дрожжегенератора показали, что возмущения $G_{воз}, \theta_p, pH, S, \theta$ невелики (порядка 3% от номинальных значений) и при наличии компенсации этих возмущений можно было бы ими пренебречь. Кроме того, в ходе эксперимен-

тов установлено, что наибольшее влияние на величину δ оказывают δ_p и G_p – концентрация и расход рассиропки. Другими словами, количество вводимых в дрожжегенератор сбраживаемых углеводов (сахара).

С учетом сказанного, а также принимая во внимание, что концентрация рассиропки на каком-то промежутке времени должна поддерживаться постоянной (величина этого промежутка составляет от 8–10 часов до нескольких суток), можно за основной канал регулирования принять изменение расхода рассиропки – изменение концентрации сахара в бродящем субстрате ($G_p \rightarrow \delta$). Так как расход рассиропки однозначно связан со скоростью разбавления D , то математическая модель статики дрожжегенератора по выбранному каналу регулирования описывается уравнениями

$$\delta = K_s \frac{D}{\mu_m - D} \quad ; \quad (4)$$

$$x = y \left(\delta_p - K_s \frac{D}{\mu_m - D} \right) \quad , \quad (5)$$

где x – концентрация дрожжей, г/л;

K_s – константа насыщения, соответствующая

$$\mu = \frac{1}{2} \mu_m ;$$

y – константа выхода;

μ_m – максимальная величина удельной скорости роста при избытке субстрата, τ^{-1} .

Кинетика процесса брожения (скорость реакции) зависит от концентрации образующейся биомассы дрожжей, которая определяется удельной скоростью роста μ . Поэтому, для решения задачи автоматического управления необходимо было выявить количественную зависимость вс-



личины накопления биомассы дрожжей от концентрации и расхода рассиропки мелассы в дрожжегенератор.

Получение этой зависимости экспериментальным путем непосредственно на промышленном дрожжегенераторе непрерывного действия в производственных условиях чрезвычайно затруднено из-за инерционности процесса и большого количества случайных возмущающих факторов, непрерывно изменяющих условия культивирования и брожения. Поэтому указанная зависимость была получена постановкой специального лабораторного эксперимента в условиях несменяемой среды с последующей проверкой в наиболее характерных точках адекватности полученных зависимостей для проточной среды.

Правомерность такого подхода базируется на известном положении, согласно которому накопление биомассы дрожжей в реакторе с несменяемой средой и в реакторе с непрерывным питанием и полным смешением подчиняется одному и тому же экспоненциальному закону.

Брожение происходило в четырех стеклянных сосудах полезной емкостью по 10 л, в которых были созданы условия, идентичные режиму брожения в дрожжегенераторе.

По усредненным данным опытов были получены кривые накопления биомассы дрожжей для четырех значений начальной концентрации рассиропки мелассы и построены соответствующие кривые удельных скоростей роста дрожжей (рис. 1).

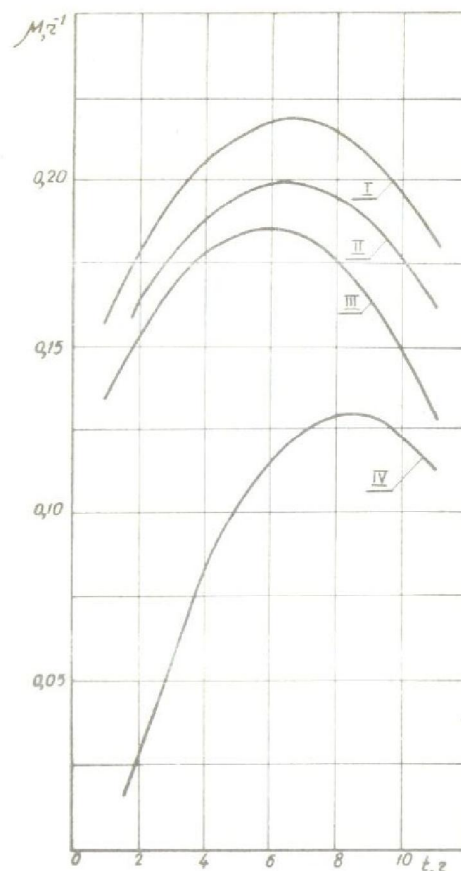


Рис. 1. Экспериментальные кривые удельной скорости роста дрожжей.

Начальная концентрация соответственно I - 15,25%, II - 16,85%, III - 19,6%, IV - 23,75% по сахарометру.

Проведенные исследования позволили путем обработки экспериментальных данных на основе применения метода Лагранжа получить математическое описание закономерности изменения удельной скорости роста дрожжей при изменении времени брожения и начальной концентрации сбраживаемой среды. Полученное уравнение можно записать в виде:

Зависимость удельной скорости роста дрожжевых клеток от времени брожения имеет экстремальный характер. Удельная скорость зависит также от изменения начальной концентрации сбраживаемой среды. С изменением времени брожения, точки абсолютного значения удельной скорости роста дрожжей перемещаются по кривой, близкой к параболе. С другой стороны, чем ниже начальная концентрация, тем выше располагается кривая удельной скорости накопления биомассы дрожжей.

$$\mu = (4,44 \times 10^{-4} t - 64,82 \times 10^{-4}) \delta_p^2 + (-0,8666 \times 10^{-4} t^2 - 152,86 \times 10^{-4} t + 2318 \times 10^{-4}) \delta_p + (4,416 \times 10^{-4} t^2 + 1549 \times 10^{-4} t - 19429) \quad (6)$$

Экспериментально получена удовлетворительная оценка точности уравнения (6) для промышленного дрожжегенератора в наиболее характерных режимах. Уравнение (6) дает возможность в статике определять удельную скорость роста дрожжей в дрожжегенераторе в зависимости от складывающейся производственной ситуации. Это же уравнение позволяет перейти к определению удельной скорости роста дрожжей в зависимости от изменения скорости разбавления среды.

В работе показано, что в качестве математической модели процесса брожения в дрожжегенераторе может быть использовано выражение

$$\frac{d\delta}{dt} = D(\delta_p - \delta) - K\delta x; \quad (7)$$

$$\frac{dx}{dt} = D(x_0 - x) + \mu x,$$

где K — константа скорости реакции;

x_0 — начальная концентрация биомассы дрожжей.

Выражение (7) представляет собой уравнение объекта и введено для исследования системы автоматического регулирования на аналоговой вычислительной машине (более подробно см. главу IУ).

Динамика дрожжегенератора по каналу $\delta_p \rightarrow \delta$ описывается уравнением звена первого порядка с запаздыванием. Динамические параметры дрожжегенератора по выбранному каналу регулирования определены экспериментально методом построения кривой разгона и равны: $T = 96$ мин; $\tau = 20$ мин; $K_{12} = 1,2 \frac{\% \text{ с.в. ч}}{\text{м}^3}$.

Полученные данные дают возможность перейти к расчету и разработке системы автоматизации дрожжегенератора, а также к построению экономико-математической

модели, устанавливающей функциональную зависимость режимных параметров с экономическими показателями производства.

Ш. ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СПИРТОВОГО БРОЖЕНИЯ МЕЛАССЫ В НЕПРЕРЫВНОЙ ОДНОПОТОЧНОЙ БАТАРЕЕ

В третьей главе разработана методика построения, выполнен расчет одного из вариантов и проведен анализ экономико-математической модели однопоточной бродильной батареи предприятия, перерабатывающего мелассу на спирт и хлебопекарные дрожжи.

В качестве экономического критерия обоснован выбор суммарной прибыли от реализации спирта и хлебопекарных дрожжей.

Разработанная модель устанавливает функциональную взаимосвязь между основными режимными параметрами процесса (расходом мелассы ρ и концентрацией δ_p сиропа мелассы) и экономическими показателями производства (себестоимостью декалитра спирта U_c , себестоимостью тонны дрожжей U_d и суммарной прибылью от реализации продукции Π) с учетом технологических, плановых и других ограничений.

В основу модели положены уравнения материального баланса и продуктового расчета, в которых переменные выражены через основные режимные параметры, а также выражения, отражающие принятую методику расчета планово-экономических показателей производства.

В общем виде модель представляет собой следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \Pi = W_c (U_c - U_c) + W_g (U_g - U_g) \\ U_{ci} = A_c + d_2 d_2 + [d_0 + N_1 (S_{ni} - S_{n_0}) + d_{03p}] \times \\ \times \frac{S_{n_0}}{S_{ni}} d_0 + \frac{H_{yc} + H_{oc} + \Phi_c}{W_c} + \rho \\ \rho = [N_3 \rho_i S_{ni} - N_2 \rho_i x_0 (2 e^{\mu t} - 1) (\frac{C_i}{\delta_p} - \frac{d_{ni-1}}{d_{ni}}) - \\ - N_4 V_\delta T_\delta x_0 (e^{\mu t} - 1)] \frac{d_0 + N_1 (S_{ni} - S_{n_0}) + d_{03p}}{S_{ni} \cdot W_c} \\ U_{gi} = A_g + [d_0 + N_1 (S_{ni} - S_{n_0}) + d_{03p}] \frac{N_2}{S_{ni}} + \\ + \frac{H_{yg} + H_{og} + \Phi_g}{W_g} \end{cases} \quad (8)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} 17,0 &\leq \delta_p \leq 23,0 ; \\ 30 \cdot 10^3 &\leq \rho \leq 100 \cdot 10^3, \end{aligned}$$

- где W_c, W_g - годовой выпуск соответственно спирта, дал/год, и дрожжей, т/год;
- U_c, U_c, U_g, U_g - себестоимость и цена соответственно 1 дал спирта, руб/год, и 1 тонны дрожжей, руб/год;
- ρ, d_n, C, S_n - соответственно расход мелассы, т/год, ее удельный вес, т/м³, содержание сухих веществ и сахара в мелассе, %;
- $N_1 - N_4$ - коэффициенты пропорциональности;
- $d_0, d_2, d_0, d_2, d_1, d_{03p}$ - экономические и весовые коэффициенты по топливу и мелассе;

- V_δ - полезный объем батареи, м³;
- T_δ - время оборота батареи, τ ;
- $\rho^*)$ - стоимость потерь сырья, руб/год;
- A_c, A_g - затраты на вспомогательные материалы за вычетом отходов и внепроизводственные затраты соответственно в расчете на 1 дал спирта, руб/дал, и на 1 тонну дрожжей, руб/т;
- Φ_c, Φ_g - годовой фонд основной и дополнительной заработной платы соответственно при производстве спирта и дрожжей, руб/год;
- $H_{yc}, H_{oc}, H_{yg}, H_{og}$ - годовая сумма соответственно условно-постоянной части цеховых и общезаводских расходов при производстве спирта и дрожжей, руб/год;
- $i = 1, 2, \dots, n$ - номер партии сырья.

Геометрически экономико-математическую модель можно представить в виде поверхности в трехмерном пространстве параметров ρ , δ_p и Π . На рис. 2 показан вариант модели построенной по результатам расчета на ЭЦВМ "Урал-2" системы уравнений (8) с учетом данных плановых калькуляций Барского спирто-дрожжевого комбината. Поверхность имеет максимум при значении производительности по расходу мелассы 87 тыс. т/год и концентрации рассиропки 19% с.в. для наиболее характерной партии перерабатываемой мелассы, имеющей значения физических констант $S = 48\%$, $d_n = 1,41$ Т/м³, $C = 78\%$.

ж) Потери сырья определяются уменьшением времени переработки сырья в батарее (при увеличении производительности батареи по перерабатываемому сырью) до величины, недостаточной для полного сбраживания сахаров.

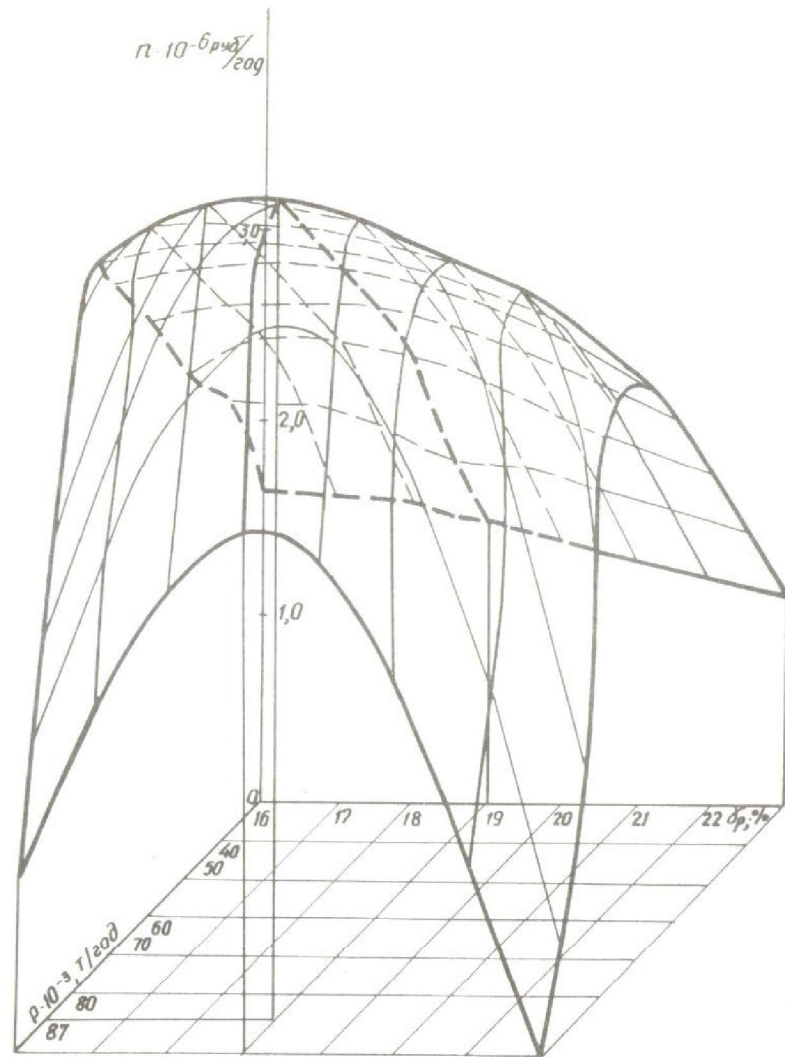


Рис. 2. Экономико-математическая модель процесса спиртового брожения мелассы в однопоточной батарее.

Координаты ($\delta_{p\text{opt}}$ и ρ_{opt}) экстремума поверхности $\Pi = f(\delta_p, \rho)$ зависят от состава мелассы, от технико-экономических показателей предприятия, на котором она перерабатывается, и от других факторов, влияющих на коэффициенты экономико-математической модели. Однако, как показано в работе, характер поверхности и методика её построения остаются неизменными.

В результате анализа модели установлено, что при постоянном значении производительности $\rho = 87$ тыс. т/год кривая $\Pi = f(\delta_p)$ может быть описана алгебраическим уравнением второго порядка. Такая аппроксимация позволила, с одной стороны, достаточно просто определить цену отклонения концентрации рассиропки от оптимального значения, а с другой стороны, — обоснованно выбрать при расчете системы критерий эффективности автоматического управления. Снижение концентрации рассиропки от оптимального значения $\delta_p = 19\%$ с.в. на 1% с.в. приводит к уменьшению прибыли от реализации на 140 тыс. руб/год.

При отклонении производительности от ρ_{opt} кривые $\Pi = f(\delta_p)$ более пологи.

Как следует из анализа сечения модели, при $\delta_{p\text{opt}} = 19\%$ кривые $\Pi = f(\rho)$ в области экстремума можно аппроксимировать уравнениями:

$$\begin{cases} \Pi = a_1\rho + b' & \text{при } \rho \leq \rho_{\text{opt}} \\ \Pi = a_2\rho + b'' & \text{при } \rho > \rho_{\text{opt}} \end{cases} \quad (9)$$

$|a_2| > |a_1|$

Форма сечений модели при значении концентрации рассиропки, отличной от $\delta_{p\text{opt}}$, изменяется незначительно.

Аппроксимация сечения модели системой уравнений (9) также позволила выбрать достаточно простой критерий эффективности автоматического управления и оценить величину экономического ущерба при отклонении производительности от оптимального значения.

С помощью модели показано, что уменьшение расхода мелассы на 5% от оптимального значения снижает прибыль от реализации на 200 тыс. руб/год, а увеличение расхода

мелассы на 5% вызывает снижение прибыли на 850 тыс. руб/год. Такое резкое снижение прибыли при $\rho > \rho_{opt}$ объясняется тем, что с увеличением значения расхода мелассы от соответствующего наиболее эффективному режиму брожения, существенно увеличиваются потери за счет того, что время нахождения продукта в батарее недостаточное для полного сбраживания сахара.

Таким образом, результаты анализа экономико-математической модели позволили целенаправленно сформулировать требования к системе автоматического управления процессом брожения в однопоточной бродильной батарее, а также устанавливать наилучшие значения регулируемых режимных параметров в зависимости от изменения производственной ситуации.

IV. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В четвертой главе на базе выводов экономико-математической модели и данных исследования статических и динамических свойств объектов регулирования выполнена разработка системы автоматического управления однопоточной бродильной батареей и приведены результаты ее производственных испытаний.

По экономико-математической модели определены экономические критерии эффективности автоматического управления. Показано, что они представляют собой интегральные оценки качества системы регулирования, характеризующие степень отклонения функции эффективности от экстремума.

По каналу регулирования концентрации рассиропки таким критерием является интеграл квадрата ошибки регулирования, поскольку, как показано выше, сечение модели при $\rho = const$ можно аппроксимировать кривой второго порядка.

По каналу регулирования расхода рассиропки критерий представляет собой интеграл модуля ошибки регулирования, так как сечение модели при $\delta\rho = const$ представляет собой в области экстремума два луча, исходящих из одной точки.

Реализация выбранного экономического критерия достигается созданием схемы автоматического управления процессом брожения, которая обеспечивает регулирование расхода рассиропки мелассы в зависимости от интенсивности сбраживания сахара. При этом величина задания регулятору в контуре стабилизации концентрации рассиропки устанавливается по экономико-математической модели.

Как было показано, система автоматизации должна обеспечивать переходные процессы с минимальным интегралом квадрата ошибки регулирования по каналу стабилизации производительности и с минимальным интегралом модуля ошибки регулирования – по каналу стабилизации концентрации рассиропки.

В условиях производства, как правило, параллельно работают от 4 до 6 дрожжегенераторов, подача рассиропки к которым осуществляется от общего коллектора. Поэтому для устранения взаимовлияния систем автоматического регулирования дрожжегенераторов для каждого из них применена система каскадного автоматического регулирования по каналу изменение расхода рассиропки – изменение концентрации бродящего субстрата (рис. 3). В указанной системе главный регулятор концентрации бродящего субстрата формирует задание регулятору стабилизации расхода рассиропки на дрожжегенератор.

Система автоматического регулирования рассиропника по каналу изменение соотношения расходов "вода-меласса" – изменение концентрации рассиропки должна удовлетворять следующему требованию: при стабилизации заданной концентрации регулированием соотношения "вода – меласса" общий расход рассиропки должен оставаться неизменным и соответствовать расходу, определяемому интенсивностью сбраживания сахара в батарее.

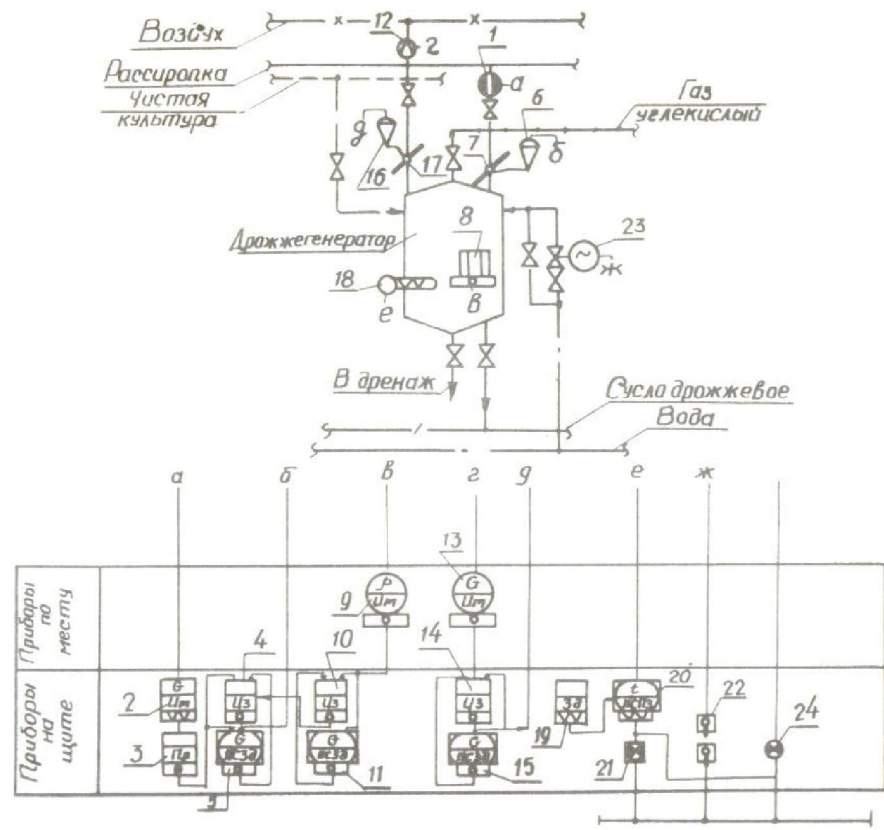


Рис. 3. Принципиальная схема автоматизации дрожжегенератора.

1, 12 - датчики расхода; 2, 3 - блок индукционного расходомера и электропневматический преобразователь; 4, 10, 14 - пневматические регуляторы и 5, 11, 15 - вторичные приборы системы "Старт"; 8, 9 - датчик плотности барботажно-пьезометрической конструкции "Пищепромавтоматика"; 16, 17, 6, 7 - регулирующие заслонки с пневмоприводами; 18 + 24 - САР температуры.

Показано, что это требование выполняется при стабилизации давления в коллекторе рассиропки (рис. 4) путем воздействия на расход мелассы и стабилизации концентрации рассиропки изменением соотношения расходов воды и мелассы.

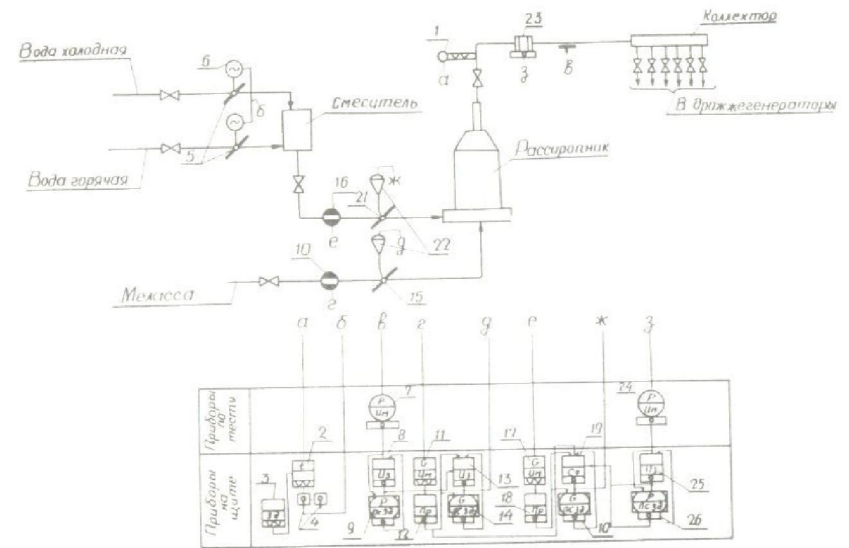


Рис. 4. Принципиальная схема автоматизации рассиропника.

1 + 6 - САР температуры рассиропки; 7 - датчик давления; 10, 11, 16, 17 - индукционные датчики расхода и электропневматические преобразователи; 8, 25 - ПИ-регуляторы; 13, 19 - регуляторы соотношения; 23, 24 - датчик плотности барботажно-пьезометрической конструкции "Пищепромавтоматика"; 9, 14, 10, 26 - вторичные приборы системы "Старт".

Автоматизация процесса брожения в однопоточной батарее предусмотрена в следующем объеме.

1. По участку рассиропника:

а) автоматическое регулирование производительности рассиропника; система автоматического регулирования производительности представляет собой каскадную схему с ПИ-регулятором в контуре стабилизации расхода мелассы и ПИ-регулятором соотношения в основном контуре регулирования давления в коллекторе;

б) автоматическое регулирование концентрации сухих веществ рассиропки мелассы; система автоматического регулирования концентрации выполнена по каскадной схеме с ПИ-регулятором соотношения в контуре регулирования соотношения расходов "вода - меласса" и ПИ-регулятором в контуре регулирования концентрации рассиропки;

в) автоматическое регулирование температуры рассиропки с применением ПИ-регулятора, воздействующего на изменение подачи соотношения теплой и горячей воды таким образом, чтобы ее общий расход на рассиропник оставался без изменения.

2. По участку дрожжегенераторов:

а) автоматическое регулирование интенсивности сбраживания; система автоматического регулирования интенсивности сбраживания представляет собой каскадную схему с ПИ-регулятором в контуре стабилизации расхода рассиропки и ПИ-регулятором в основном контуре регулирования концентрации сухих веществ в бродящем субстрате;

б) автоматическое регулирование расхода воздуха, подаваемого на аэрацию дрожжей, с применением ПИ-регулятора;

в) автоматическое регулирование температуры бродящего субстрата изменением подачи охлаждающей воды в змеевики дрожжегенераторов с применением регулятора релейного действия и схемы многокаскадного регулирования.

3. По участку бродильных аппаратов:

а) автоматическое регулирование температуры в бродильных аппаратах № 1 + 6 с применением регулятора релейного действия и схемы многоканального регулирования;

б) автоматический контроль концентрации сухих веществ в бродильных аппаратах № 8 + 9 с сигнализацией неполного сбраживания сахаров, определяемого по их разности;

в) автоматический контроль pH субстрата на входе и выходе бродильной батареи.

На систему автоматического регулирования производительностью рассиропника и систему автоматического регулирования интенсивности сбраживания получены авторские свидетельства Комитета по делам изобретений и открытий при СМ СССР.

Путем моделирования на аналоговой вычислительной машине проведены исследования системы автоматического регулирования дрожжегенератора по каналу: изменение расхода рассиропки - изменение концентрации сахара в бродящем субстрате ($G_p \rightarrow \delta$), обладающему существенным емкостным запаздыванием, для случая применения ПИ-регулятора.

При моделировании учитывались изменения скорости разбавления в режиме заполнения и протока среды в рабочем диапазоне. В установившемся режиме (после заполнения дрожжегенератора) скорость разбавления равна

$$D = \frac{G_p}{V_g}, \quad (10)$$

где V_g - полезный объем дрожжегенератора,

а при заполнении

$$D = \frac{G_p}{V_0 + \int_0^t G_p dt}, \quad (11)$$

где V_0 - объем засевных дрожжей в дрожжегенераторе.

В результате моделирования установлено, что выбранный ПИ-регулятор обеспечивает при одних и тех же настройках заданные параметры качества регулирования как

в период заполнения, так и при работе в межстерилизационный период.

Одновременно были определены оптимальные параметры настройки регуляторов с учетом минимизации выше указанных интегральных оценок применительно к однопоточной бродильной батарее Барского спирто-дрожжевого комбината.

На основе экспериментальных исследований показано, что для регулирования температуры в бродильных аппаратах может быть выбран регулятор релейного действия. Полученные результаты позволили разработать схему многоканального контроля и регулирования температуры на базе электронного моста типа ЭМР-209 РДМЗ, которая предусматривает регулирование температуры в каждом аппарате с индивидуальным заданием, дистанционное управление исполнительными механизмами, сигнализацию точек контроля температуры, сигнализацию положений исполнительных механизмов.

Разработанная система автоматизации процесса брожения в однопоточной бродильной батарее универсальна и позволяет реализовать выбранный экономический критерий управления при внедрении ее на спиртовых заводах, где бродильные батареи содержат разное количество дрожжегенераторов и бродильных аппаратов. Это дает возможность рекомендовать разработанную систему к широкому распространению в промышленности.

Система автоматизации была внедрена и прошла производственные испытания на Барском спирто-дрожжевом комбинате. Результаты испытаний показали, что предложенная схема автоматизации надежна в работе и удовлетворяет технологическим требованиям.

Внедрение разработанной системы автоматизации с использованием экономико-математической модели обеспечивает Барскому спирто-дрожжевому комбинату получение годового экономического эффекта в сумме 53,8 тыс. руб. Экономический потенциал от внедрения результатов исследований только на 15 спиртовых заводах составляет на 1975 год 807,5 тыс. руб.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Получено математическое описание статики и динамики основных аппаратов бродильной батареи. Показано, что по основным каналам объекты автоматического регулирования можно с достаточной степенью точности аппроксимировать звеньями первого порядка с запаздыванием.

2. Разработана методика и построена экономико-математическая модель процесса брожения мелассы в однопоточной батарее.

3. Разработана методика использования экономической модели для расчета оптимальных режимов и формулирования требований к системе автоматического регулирования. Обоснованы интегральные оценки качества системы автоматического регулирования расхода и концентрации рассиропки мелассы.

4. Показано, что зависимость суммарной прибыли производства спирта и хлебопекарных дрожжей от основных режимных параметров имеет экстремальный характер, причем координаты экстремума изменяются при переходе к различным партиям сырья.

5. Экспериментально установлена и математически описана взаимосвязь удельной скорости роста биомассы дрожжей с основными управляющими воздействиями.

6. Показано, что для Барского спирто-дрожжевого комбината наилучшие технико-экономические показатели достигаются при производительности предприятия, равной 87 тыс. тонн мелассы в год, и концентрации рассиропки 19% сухих веществ для случая переработки наиболее характерных партий мелассы.

7. Предложена и разработана принципиально новая система автоматического управления процессом брожения в однопоточной батарее. Основная отличительная особенность системы — управление производительностью батареи по интенсивности сбраживания сахаров и стабилизации концентрации рассиропки на уровне, рекомендованном экономико-математической моделью.

8. Система прошла производственные испытания на Барском спирто-дрожжевом комбинате. Результаты испытаний показали соответствие системы технологическим требованиям, ее работоспособность и эффективность. Универсальность системы позволяет рекомендовать ее к распространению в промышленности.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Соколов В.А. Способ автоматического управления процессом непрерывного культивирования микроорганизмов. Авторское свидетельство № 253726. Бюл. № 31.1970.

2. Соколов В.А., Муханов А.В., Телис П.И. Способ автоматического управления процессом приготовления расиронки. Решение Комитета по делам изобретений и открытий при СМ СССР по заявке № 1358453/28-13, март, 1970.

3. Свирида В.Г., Соколов В.А., Майдельштейн М.Л., Шлафер И.М. Состояние и основные направления автоматизации спиртового производства, ЦИНТИпищепром, М., 1967.

4. Комлев А.И., Соколов В.А. Автоматизация процессов спиртового брожения, "Ферментная и спиртовая промышленность", № 3, 1967.

5. Соколов В.А., Высоцкий В.А., Кондратюк М.И. Система автоматического регулирования температуры процесса брожения, "Ферментная и спиртовая промышленность", № 4, 1964.

6. Соколов В.А., Радченко В.В., Горайнов Ю.А. Автоматический контроль pH в производственном процессе спиртового брожения, "Ферментная и спиртовая промышленность", № 5, 1969.

7. Соколов В.А., Стретьячук Т.И., Белокопъ В.Н. Математическое описание процесса накопления биомассы дрожжей в дрожжегенераторе, "Ферментная и спиртовая промышленность", № 2, 1970.

8. Соколов В.А. Исследование и разработка системы управления процессом спиртового брожения мелассы в однопоточной батарее, "Труды и рефераты института "Пищепромавтоматика", вып. 6, Одесса, 1970.

Основные результаты работы доложены:

1. На Всесоюзном совещании по координации научно-исследовательских работ в области автоматизации пищевой промышленности, Одесса, 1969.

2. На заседании секции спиртовой и ликеро-водочной промышленности научно-технического Совета Министерства пищевой промышленности УССР, Киев, 1969.