

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ НЕПРЕРЫВНОЙ СТЕРИЛИЗАЦИИ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ В БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Д.В. Зубов, М.А. Кокотко,

Э.А. Крамм (Московский государственный университет инженерной экологии)

Рассмотрена задача управления установкой непрерывной стерилизации питательной среды в микробиологическом производстве. Поставлена задача поддержания на заданном уровне значения критерия стерилизации. Выведены формулы для расчета по экспериментальным данным коэффициентов отмирания культуры-контаминанта. Построена математическая модель функционирования установки непрерывной стерилизации, обогреваемой глхим паром.

Ключевые слова: математическое моделирование, непрерывная термическая стерилизация, управление по косвенным показателям, виртуальное измерение.

Введение

Промышленная биотехнология является одним из приоритетных направлений развития науки и производства во всем мире. Биомасса микроорганизмов, как и продукты их жизнедеятельности, находят широкое применение в таких отраслях, как медицинская промышленность (антибиотики, витамины), здравоохранение (вакцины, бактериальные препараты), пищевая промышленность (ферменты, дрожжи, органические кислоты).

Качество препаратов микробиологического синтеза чувствительны к наличию посторонней микрофлоры и продуктов ее жизнедеятельности. Присутствие контаминантов в ферментационной среде снижает эффективность культивирования и может привести к синтезу продуктов, отличных от целевого вещества, что, как правило, недопустимо. Для подавляющего большинства биотехнологических производств проникновение контаминантов в ферментер означает нарушение ТП и производственный брак, что обычно ведет к финансовым издержкам и перерасходу тепла и энергии. Посторонняя микрофлора также отрицательно влияет на качество технологических операций, следующих за ферментацией (фильтрация, ультрафильтрация, ионный обмен), снижая скорость выделения и, как следствие, эффективность производства.

Для предотвращения развития и размножения нежелательной микрофлоры используют различные способы стерилизации. Наиболее распространенной является термическая стерилизация. Используются также механическая, химическая, радиационная и ультразвуковая стерилизация, а также микрофильтрация. Использование тех или иных способов деконтаминации обусловлено необходимой степенью полноты стерилизации; масштабом производства; требованиями к качеству среды после стерилизации; экологическими требованиями и технической оснащенностью и экономикой процесса.

Количественная характеристика процесса стерилизации

Количественно эффективность процесса стерилизации твердых и жидких сред характеризуется критерием стерилизации ∇ [1]:

$$\nabla = \ln N_0/N, \quad (1)$$

где ∇ – критерий стерилизации; N_0 – начальное число клеток микроорганизмов; N – число клеток микроорганизмов, оставшихся после стерилизации.

Число контаминантов N_0 и N определяется высевами образцов по специальной методике. Обычно критерий стерилизации варьирует в пределах $25 < \nabla < 35$.

Теоретические значения критерия (1) вычисляются по формуле [1]:

$$\nabla = A \int_0^{\tau_c} e^{-\frac{E}{RT(\tau)}} d\tau, \quad (2)$$

где τ_c – время стерилизации, мин; $T(\tau)$ – температура стерилизуемой среды в момент времени τ , К; A – предэкспоненциальный множитель; R – универсальная газовая постоянная; E – энергия активации контаминанта.

Конкретные значения параметров A и E зависят от вида микроорганизма-контаминанта и состава среды. Их нужно определять экспериментально [2].

Установки термической стерилизации

В биотехнологической промышленности наиболее часто используется термическая стерилизация, которую можно использовать практически для любых субстратов. Этот способ стерилизации довольно экономичен, а водяной пар, используемый в качестве источника тепла, – легко доступен. Кроме того, накоплен обширный опыт в проектировании и эксплуатации тепловых установок, применяемых при тепловой стерилизации.

Термическая стерилизация может проводится непрерывно или периодически. Периодическая стерилизация хорошо изучена: в заранее вымытый и простерилизованный острым паром аппарат вносится пита-

*Наши пищевые вещества должны
быть ледяным средством,
а наши ледяные средства должны
быть пищевыми веществами.*

Гиппократ

тельная среда, которая нагревается до заданной температуры подачи насыщенного пара в рубашку (если недопустимо разбавление среды конденсатом) или острого пара непосредственно в стерилизуемую среду, если разбавление среды возможно. Периодическая стерилизация удобна, когда проводится непосредственно в том аппарате, в котором будет проводиться основной процесс, — в ферментере. Если простерилизованную среду приходится передавать по трубопроводам или необходимо простерилизовать большие объемы сред, ее преимущества нивелируются.

Установки непрерывной стерилизации (УНС) целесообразно применять на крупных непрерывных производствах либо, если основной процесс является периодическим, но стерилизация в ферментере экономически нецелесообразна.

Наиболее часто применяемая принципиальная схема стерилизации включает подогрев среды острым паром (в стерилизационной колонке) с последующим ее выдерживанием при температуре стерилизации и охлаждением. Для экономии тепловой энергии линии стерилизации комплектуют: рекуперационным теплообменником для подогрева питательной среды до 80...90 °С охлаждаемой стерильной средой; паровым инжектором (паровой колонкой) для повышения температуры стерилизации острым паром; выдерживателем; расширителем, в котором происходит быстрый сброс температуры среды до 90...95 °С; теплообменником для конденсации пара из расширителя и окончательного охлаждения (после охлаждения свежей среды) питательной среды до температуры ферментации. Применяют также упрощенные варианты этой схемы, в том числе объемные выдерживатели без расширителя.

Однако на практике такие установки не очень удобны, так как в них происходит разбавление стерилизуемой среды конденсатом стерилизующего пара. Поэтому обосновано применение УНС с пластинча-

тыми теплообменниками, которые обладают рядом ценных технологических свойств — легко собираются и разбираются для очистки, достаточно дешевы и позволяют организовать рекуперацию тепла: в первом теплообменнике поток продукта нагревается глухим насыщенным паром, а во втором — охлаждается, передавая тепло потоку, идущему в первый теплообменник (рис. 1). Возникает задача управления этими модулями с целью снижения энергозатрат и предотвращения проскока простерилизованного продукта.

Анализ работы УНС в производстве бактериоцина низина

Низин (пищевая добавка Е-234) производится путем биосинтеза в периодическом процессе. В предварительно простерилизованный острым паром ферментер вносят стерильную питательную среду, охлаждают до температуры культивирования (30 °С), вносят посевной материал (живую культуру *Lactococcus lactis*), после чего начинается процесс наработки низина. Продукт низина является факультативным анаэробом, поэтому нет необходимости в подаче стерильного воздуха, и в ходе биосинтеза выделяется сравнительно небольшое количество тепла. Температура в ходе процесса поддерживается подачей охлаждающей воды в рубашку, показатель рН — подачей стерильного раствора NaOH. По окончании процесса ферментационную среду передают на выделение низина.

Одним из наиболее дорогостоящих компонентов питательной среды в производстве низина является сухое молоко, которое загрязнено различными культурами-контаминантами, причем уровень загрязнения и устойчивости контаминантов к стерилизации могут существенно варьировать от партии к партии. Присутствие посторонней микрофлоры в процессе культивирования приводит к снижению производства низина и непроизводительному расходу ценных компонентов питательной среды. Повышение температуры стерилизации или увеличение ее продолжительности приводит к гибели спор культур-контаминантов, но снижает сырьевую доступность питательной среды вследствие процесса карамелизации сахаров. Возникает задача поиска оптимального режима стерилизации питательных сред в производстве низина.

Установка непрерывной стерилизации обслуживает несколько ферментеров, что является причиной переменного расхода питательной среды. Также могут быть возмущения по температуре греющего пара. Поддержание температуры среды на выходе стерилизующего теплообменника с помощью подачи греющего пара не является эффективным из-за переменного времени пребывания среды в теплообменнике. Непосредственное определение выживших спор культур-контаминантов микробиологическим способом занимает ≥ 2 сут. и поэтому не может быть использовано в контурах автоматизированного управления.

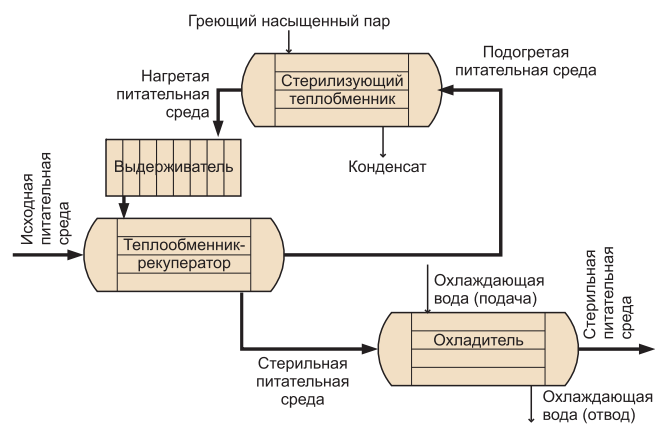


Рис. 1. Схема установки непрерывной стерилизации

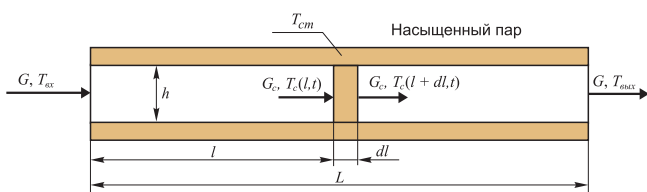


Рис. 2. Схема теплообменника-стерилизатора

Как указано в работе [3], для возникновения нестерильной ситуации достаточно проскока весьма малого числа клеток или спор культур-контаминантов. Принимая во внимание, что скорость диффузии спор-контаминантов примерно в 1000 раз меньше скорости конвективного потока, можно рассматривать УНС как два последовательно соединенных реактора идеального вытеснения – пластинчатый теплообменник-стерилизатор и выдерживатель.

Был рассмотрен пластинчатый теплообменник (рис. 2) как звено идеального вытеснения, и получены математическая модель для расчета значений температур потока стерилизуемой среды и математическая модель для расчета значений критерия стерилизации на выходе из УНС в зависимости от расхода стерилизуемой питательной среды и расхода греющего пара.

Тепловой баланс для элементарного объема питательной среды:

$$-\left[G_c(t)Cp_c \frac{\partial T_c(l,t)}{\partial l} + kH(T_c(l,t) - T_{cm}(t))\right] = Hh\rho_c Cp_c \frac{\partial T_c(l,t)}{\partial t}, \quad (3)$$

где $G_c(t)$ – расход питательной среды (переменный); $T_c(l, t)$ – температура питательной среды в момент времени t на расстоянии l от входа в теплообменник-стерилизатор; $T_{cm}(t)$ – температура стенки теплообменника в момент времени t ; H – ширина теплообменника; h – высота просвета теплообменника (толщина слоя питательной среды); Cp_c – теплоемкость стерилизуемой среды; k – коэффициент теплоотдачи между стенкой и стерилизуемой средой; ρ_c – плотность стерилизуемой среды.

Начальное условие: $T_c(l, 0) = \tilde{T}_c^n(l)$. Граничное условие: $T_c(0, t) = T_{Bx}(t)$.

Массовый расход G_c связан с линейной скоростью потока V : $G_c(t) = V(t)Hh\rho_c$.

Тепловой баланс для стенки теплообменника:

$$q_{kn}G_n(t) - kHL(T_{cm}(t) - \bar{T}_c(t)) = m_{cm} Cp_{cm} \frac{dT_{cm}(t)}{dt}, \quad (4)$$

где q_{kn} – теплота конденсации греющего пара; G_n – расход греющего пара; Cp_{cm} – теплоемкость материала стенки; $\bar{T}_c(t)$ – средняя температура среды в теплообменнике рассчитывается по формуле:

$$\bar{T}_c(t) = \frac{\int_0^L T_c(l, t) dl}{L}.$$

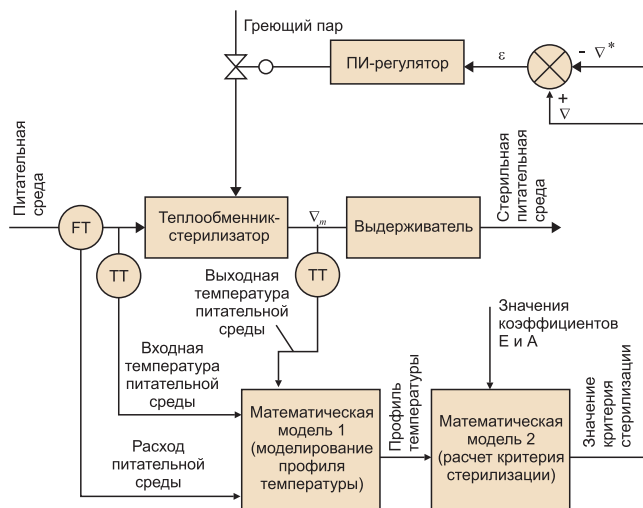


Рис. 3. Структура АСУ УНС

Начальное условие: $T_{cm}(0) = T_{cm}^n$.

Совместное решение уравнений (3) – (4) позволяет получить значения температуры стерилизуемой питательной среды $T_c(l, t)$.

Расчет текущего значения критерия стерилизации на выходе из теплообменника при помощи выражения (2) имеет вид:

$$\nabla_m(t) = A \int_0^{\tau_c} \exp\left(-E/RT(t-\tau, L - \int_0^{\tau} V(t-z) dz)\right) d\tau, \quad (5)$$

где $V(t-z)$ – линейная скорость потока в момент времени $t-z$; τ_c – время, проведенное средой в теплообменнике, определяется из соотношения:

$$\int_0^{\tau_c} V(t-\tau) d\tau = L. \quad (6)$$

Пренебрегая теплообменом с окружающей средой и тепловой инерцией стенок выдерживателя, получим величину критерия стерилизации на выходе из выдерживателя:

$$\nabla(t) = A \int_0^{\tau_B} \exp\left(-E/RT(t-\tau_B, L)\right) d\tau + \nabla_m(t-\tau_B) = A\tau_B \exp\left(-E/RT(t-\tau_B, L)\right) + \nabla_m(t-\tau_B), \quad (7)$$

где время пребывания среды в выдерживателе в расчитывается по формуле:

$$\int_0^{\tau_B} V(t-\tau) d\tau = L_B. \quad (8)$$

Предлагается осуществлять управление расходом пара на теплообменник-стерилизатор на основе значения критерия стерилизации, рассчитанного по математической модели 2 (5) – (8).

Таким образом, представляется целесообразной следующая структура АСУ УНС (рис. 3).

1) На основании данных, полученных от датчиков расхода и температуры питательной среды, моделируется текущий профиль температуры по длине теплообменника-стерилизатора (в предположении ре-

жима идеального вытеснения). Адекватность модели обеспечивается сравнением температуры на выходе из теплообменника, рассчитанной по модели и измеренной датчиком. При необходимости осуществляется коррекция коэффициента теплопередачи k .

2) На основе полученного профиля температуры рассчитывается значение критерия стерилизации. Параметры математической модели корректируются при переходе на новую партию сырья (по данным пробной стерилизации в лабораторном автоклаве).

3) Полученное значение критерия стерилизации ∇ сравнивается с заданным значением ∇^* , и их разница ϵ поступает на вход ПИ-регулятора, управляющего клапаном на подаче греющего пара.

Заключение

Предложена структура АСУ УНС, обеспечивающая необходимое качество стерилизации питательной среды и минимальную себестоимость процесса.

Управление УНС при разных расходах стерилизуемой питательной среды осуществляется по рассчитываемому показателю — критерию стерилизации, вычисляемому по профилю температур. Последний получается в результате моделирования на основе данных, поступивших от датчиков температуры и расхода. В качестве выходной переменной АСУ УНС предло-

жено использовать значения критерия стерилизации, рассчитываемое по модели, разработана система стабилизации значения критерия стерилизации.

Работа была выполнена в рамках реконструкции завода фирмы "Макофарм" (г. Лотошино, Московская область) при переходе с производства витаминных добавок и спирта на производство бактериоцинов низина (пищевая добавка E234). Основным компонентом питательной среды в производстве низина является сухое молоко, и избыточный перегрев приводит к непроизводительной потере ценных компонентов среды. Использование АСУ УНС позволяет достичь необходимой стерильности питательной среды без ее избыточного перегрева.

Список литературы

1. *Матвеев В.Е.* Основы асептики в технологии чистых микробиологических препаратов. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1981.
2. *Зубов Д.В., Кокотко М.А.* Параметрическая идентификация процесса стерилизации молочных продуктов // Математические методы в технике и технологиях ММТТ 20. Том 5. Ярославль: Изд. Яросл. гос. техн. ун-та. 2007.
3. *Матвеев М.В., Плессер Л.М.* Расчет необходимой эффективности процессов, препятствующих проникновению посторонней микрофлоры на различных стадиях асептического производства // Биотехнология. 2001. № 6.

Зубов Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, доцент,

Кокотко Михаил Андреевич — аспирант кафедры технической кибернетики и автоматики,

Крамм Эдуард Александрович — д-р техн. наук, проф. кафедры экологической и промышленной биотехнологии Московского государственного университета инженерной экологии.

Контактные телефоны: (499) 267-07-57, 267-07-82. E-mail: zubov@mguie.ru

Acti 9 – модульная система 5-го поколения для конечного распределения электроэнергии

В октябре 2010 г., в Москве компания "Шнейдер Электрик" представила Acti 9 – самую надежную, эффективную и простую в эксплуатации модульную систему для конечного распределения электроэнергии в зданиях и на промышленных объектах. Система Acti 9 аккумулирует опыт пяти поколений модульного оборудования, производимого компанией Schneider Electric на протяжении последних 40 лет, и реализует 21 запатентованное ноу-хау.

Система Acti 9 представляет собой гибкую и открытую систему, спроектированную по принципу "все в одном" и способную обмениваться данными с любой системой управления зданием. Поэтому при введении новых правил и технических требований, предъявляемых к построению электроустановок, Acti 9 может быть легко изменена и адаптирована.

Непревзойденный уровень надежности и безопасности Acti 9 обеспечивается за счет функции VisiSafe миниатюрного выключателя iC60 и дифференциального выключателя нагрузки серии iID. Передняя панель класса II, исключая соприкосновение внутренних деталей Acti 9 и поверхностей выключателя, гарантирует уровень безопасности, превышающий более чем в два раза самые высокие промышленные стандарты. Это обеспечивает безопасное прохождение тока в цепи вне зависимости от перенапряжения и опыта оператора даже в самых жестких условиях эксплуатации.

Функция Acti 9 VisiTrip позволяет оперативно проводить диагностику установки, идентифицировать все ли-

нии повреждения с первого взгляда, быстро устранять неисправности и повторно подключать потребителей к сети, что обеспечивает эффективное управление установками и сокращение времени простоев. При этом сверхпомехоустойчивость дифференциального устройства Acti 9 гарантирует самый высокий уровень бесперебойности работы и электрическую стойкость аппарата, даже если он подвергается электромагнитному или химическому воздействию.

В Acti 9 впервые применено новое автоматическое устройство повторного включения (ARA iC60), позволяющее сокращать расходы на эксплуатацию электроустановок на отдаленных объектах инфраструктуры. Кроме того, в Acti 9 интегрировано устройство Reflex iC60, которое объединяет автоматический выключатель и встроенный привод, что в совокупности позволяет коммутировать, например, осветительную нагрузку. Reflex iC60 может управляться ПЛК и легко вписывается в систему управления зданием, не требуя для этого дополнительных устройств или модернизации. Таким образом, продукт позволяет гибко перестроить электроустановку при изменении требований к системам управления освещением промышленных и административно-коммерческих объектов.

Система Acti 9 изготовлена из утилизируемых и повторно используемых материалов, что доказывает его 100% соответствие экологическим требованиям. Она может подстраиваться и изменяться согласно требованиям в области энергоэффективности и охраны окружающей среды.

[Http://www.schneider-electric.ru](http://www.schneider-electric.ru)