

УДК 681.518

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – НОВАЯ БАЗА ПОСТРОЕНИЯ И РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

¹Лубенцова Е.В., ²Петраков В.А.

¹*Невинномысский технологический институт, Северо-Кавказский федеральный университет, Невинномысск, e-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru;*

²*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

В работе проведен аналитический обзор научных работ по применению методов нечеткой логики и нейронных сетей для решения задач синтеза интеллектуальных систем управления биотехнологическими объектами. Показано, что биотехнологические объекты относятся к сложным системам. В подтверждение этого приведены виды и источники неопределенности информации, характерной для объектов биотехнологии. Отмечено, что число публикаций, посвященных интеллектуальным системам управления на основе методов нечеткой логики и нейросетевой технологии, огромно и продолжает увеличиваться. Однако, несмотря на большое число работ для различных объектов, их анализ позволяет выявить ограниченное число публикаций, содержащих результаты построения интеллектуальных систем управления биотехнологическими объектами. Приведенными в статье примерами подтверждена эффективность применения интеллектуальных систем управления биотехнологическими объектами управления в условиях существования дефицита априорной информации для их точного математического описания. С учетом этих работ отмечено, что методы нечеткого и нейросетевого управления в настоящее время являются перспективными методами интеллектуальных технологий, позволяющих создавать высококачественные системы управления биотехнологическими объектами в условиях неопределенности.

Ключевые слова: аналитический обзор, нечеткая логика, нейросетевой регулятор, интеллектуальная система, биотехнологический объект управления

INTELLECTUAL TECHNOLOGIES – THE NEW BASE CONSTRUCTION AND SYSTEMS DEVELOPMENT AUTOMATION OF COMPLEX BIOTECHNOLOGICAL PROCESSES

¹Lubentsova E.V., ²Petrakov V.A.

¹*Nevinnomyssk institute of technology of the North-Caucasian federal university, Nevinnomyssk, e-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru;*

²*South Federal University, Rostov-on-Don*

The paper presents an analytical review of scientific works on the application of methods of fuzzy logic and neural networks for solving problems of synthesis of intellectual control systems of biotechnological objects. It is shown that biotechnological objects are complex systems. In confirmation of this shows the types and sources of uncertainty of information is typical of objects of biotechnology. It is noted that the number of publications devoted to intellectual control systems based on the methods of fuzzy logic and neural network technology is enormous and continues to grow. However, despite the large number of works for different objects, their analysis allows us to identify a limited number of publications containing the results of construction of intellectual systems control of biotechnological objects. In article examples confirmed the effectiveness of the intellectual control systems biotechnological objects control in the conditions of deficiency of the deficit a priori information for their exact mathematical description. Taking into account these works it is noted that the methods of fuzzy and neural network control are now promising methods of intellectual technology that allows to create high quality systems control of biotechnological objects in the conditions of uncertainty.

Keywords: analytical review, fuzzy logic, neural network controller, intellectual system, biotechnological control object

Национальной программой развития биотехнологии в Российской Федерации определена важнейшая роль процессов ферментации для решения задач промышленной микробиологии по производству лекарственных препаратов, биологически активных веществ, белково-витаминных концентратов, антибиотиков, бактериальных и вирусных препаратов в промышленности, медицине и сельском хозяйстве. Современные лекарственные средства получают, в основном, в результате микробиологического синтеза, который пред-

ставляет собой сложный многостадийный процесс [1], характеризующийся недостаточной (неполной) наблюдаемостью (невозможностью прямого измерения большинства показателей, непосредственно влияющих на качество продукции, таких как концентрации реагентов, их физико-химические свойства) и управляемостью, нестационарностью и нелинейностью [2]. Высокая стоимость реагентов и оборудования может стать причиной существенных экономических потерь в случае аварий и нештатных ситуаций.

Минэкономразвития России определена важнейшая роль биотехнологических систем, предназначенных для решения задач промышленной микробиологии по производству биологически активных веществ, белково-витаминных концентратов, антибиотиков, бактериальных и вирусных препаратов. В 2009 г. была утверждена «Стратегия развития фармацевтической промышленности Российской Федерации на период до 2020 года» («Фарма-2020»), в 2010 г. – Концепция федеральной целевой программы «Развитие фармацевтической и медицинской промышленности Российской Федерации на период до 2020 года и дальнейшую перспективу». Объем производства биотехнологической продукции в России к 2020 году, согласно разработанной Минэкономразвития программе «БИО-2020», возрастет до 800 миллиардов рублей в сравнении с 24 миллиардами рублей в 2010 год [3].

Несмотря на имеющиеся исследования и разработки, направленные на решение проблемы динамичного развития фармацевтической и медицинской промышленности Российской Федерации, они не достаточно затрагивают вопросы автоматизации и управления биотехнологическими процессами (БТП) и производствами и не носят системного и комплексного характера.

Для отечественных производств, как и для зарубежных многоассортиментных фармацевтических производств, существенной становится проблема управления при переходе на новый вид продукции, который часто сопровождается изменениями технологической схемы и приводит к вынужденным простоям из-за наладки оборудования и настройки систем управления [4]. В связи с этим, актуальной задачей становится разработка системы управления, адаптивной по отношению к различным классам выпускаемых продуктов и производительности. Благодаря оперативной автоматизированной настройке и адаптации такая система позволит существенно сократить экономические потери, связанные с переходом на новый вид продукции.

В деле повышения эффективности намеченных мер, сокращения времени на разработку новых технологий и реализацию промышленного производства важная роль отводится проектированию и развитию САУ и АСУ БТП, позволяющих при оптимальном сочетании традиционных и интеллектуальных методов и алгоритмов управления обеспечить простоту многовариантного решения компоновки алгоритмического обеспечения конкретных АСУ при многообразии биотехнологий в соответствии с поставленными задачами.

Специфика биотехнологических объектов (БТО) характеризуется недостаточной изученностью лежащих в их основе теоретических механизмов, наличием большого числа многоуровневых качественных и количественных факторов, значительной изменчивостью результатов наблюдений, обусловленной действием неуправляемых переменных, нарушением предпосылок стандартных методов статистического анализа, относительно невысокой воспроизводимостью, неоднородностью и ограниченностью данных. Все это обуславливает, во-первых, неэффективность использования традиционных методов синтеза систем на основе математических моделей объектов и, во-вторых, необходимость применения новых подходов для решения задач синтеза управления указанными объектами с учетом их специфики.

Известно [5], что система определяется как сложная, если для построения ее модели недостаточно информации. Процессы живых систем не поддаются формализации, что приводит к необходимости привлечения человека, его способности ориентироваться в слабо структурируемой ситуации и находить решение слабо формализуемых задач в условиях неполного, нечеткого и неточного знания характеристик объекта управления и характеристик внешних и внутренних воздействий, при которых функционирует этот биотехнологический объект.

Основные причины, усложняющие автоматизацию биотехнологических процессов, состоят в отсутствии достаточных знаний о явлениях, связанных с метаболизмом микроорганизмов и синтезом целевых продуктов. На сегодняшний день для решения подобного рода задач управления широко используются интеллектуальные методы. Среди них выделяют следующие типы интеллектуальных систем управления: на основе нечеткой логики (НЛ) и на основе нейросетевых (НС) технологий [6,7]. Системы управления с нечеткими регуляторами хорошо зарекомендовали себя при управлении сложными объектами с параметрами, изменяющимися в широких пределах [8]. Системы с нейросетевыми регуляторами не требуют построения базы правил. Системы управления на основе объединения указанных принципов, т.е. системы с нейро-нечеткими регуляторами, способны во многом удовлетворить современным требованиям проектируемых систем. Кроме того, используя технологию синтеза интеллектуальных алгоритмов управления, возможно провести оптимизацию сложных контуров САУ. При этом существующие теоретические и экспериментальные исследования,

объясняющие отдельные элементы и закономерности функционирования процесса биосинтеза, составляют набор рабочих гипотез процесса, которым может воспользоваться оператор при управлении процессом. Важную роль играют его собственный опыт и интуиция.

Проблема управления сложными процессами ферментации в условиях неопределенности относится к актуальным проблемам современной теории и практики автоматического управления. Во-первых, для такого класса систем типичным становится случай, когда отсутствует точное математическое описание объекта управления, процесс плохо воспроизводится, а изменение его параметров в процессе функционирования происходит неизвестным образом в широких пределах [9]. Во-вторых, вместе с появлением новых биотехнологических процессов и биообъектов возникают более высокие требования к разрабатываемым системам управления, которые ранее невозможно было выполнить. В-третьих, каждый процесс имеет свои особенности, которые, с одной стороны, требуют учитывать при автоматизации, а, с другой стороны, они не в полной мере могут быть учтены существующими системами и подходами к синтезу систем. Хорошо известно, что для синтеза систем управления в условиях неопределенности большими возможностями обладают адаптивные подходы. Однако следует отметить, что основным недостатком теории адаптивных систем является предположение о квазистационарности параметров модели объекта управления и использование контуров настройки параметров. Альтернативным адаптивному управлению являются робастное управление, а также управление на основе нечеткой логики и нейросетевой технологии. По сравнению с адаптивными законами управления здесь есть возможность построить управляющую систему без использования контуров настройки параметров, нет необходимости в математической модели объекта и в предположении о квазистационарности параметров объекта управления. Однако применение этих методов для синтеза систем управления БТО и процессами ферментационной системы исследовано недостаточно.

Следует отметить, что, несмотря на достаточно большое количество решений в области адаптивного и робастного управления, имеется ряд проблем, которые мало изучены для синтеза таких систем для управления процессами ферментации. Это обусловлено тем, что БТО являются нестационарными объектами, имеют запаздывание по состоянию и/или управлению,

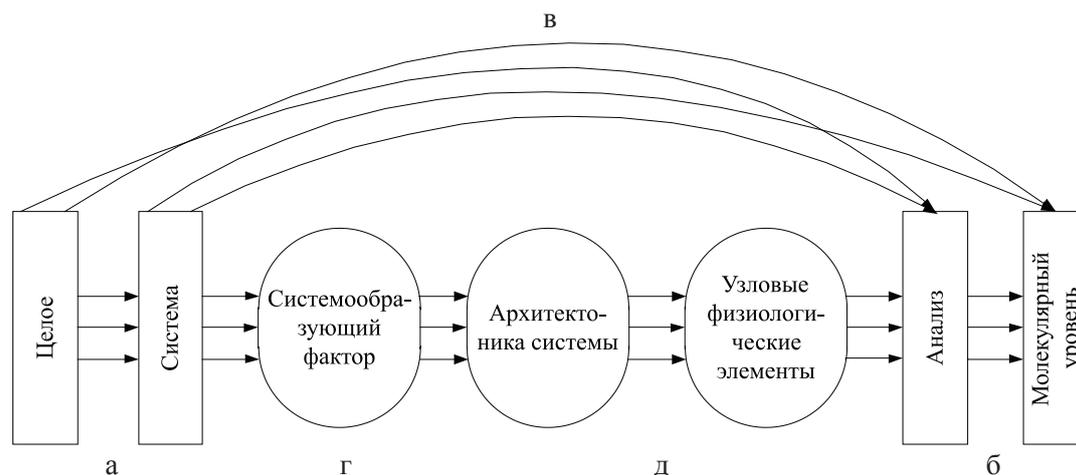
характеризуются некоторыми свойствами нелинейных систем ввиду наличия неконтролируемых возмущений: тепловыделения, потребления кислорода и др. Кроме того, многие существующие способы адаптивного и робастного управления достаточно сложны как в аналитическом расчете системы регулирования, так и в ее технической реализации.

Для повышения конкурентоспособности и снижения импортозависимости по важнейшим традиционным биотехнологическим продуктам – лекарственным препаратам, биологически активным веществам, белково-витаминным концентратам, бактериальным и вирусным препаратам, производимым в Российской Федерации, требуется более широкое использование интеллектуальных технологий при управлении процессами ферментации – одной из основных составляющих производства, как по сложности реализации, так и по влиянию на рентабельность производства [10].

Анализ общесистемных свойств и видов неопределенности информации, характерных для управления процессами ферментации

Современный уровень развития прикладной биотехнологии сопровождается созданием управляемых объектов различного назначения и требует учета факторов неопределенности информации, характерных для процесса управления сложными ферментационными системами. По сути протекающих процессов биореактор относится к биологическим системам. В качестве методологической основы анализа биологической системы и выявления общесистемных свойств и причин возникновения неопределенности информации является системный подход. При системном подходе не выделяется какая-либо отдельная составляющая, а используются принципы организации многих составляющих с непрерывным изучением результата деятельности этой разветвленной гетерогенной системы [11]. Ключевым моментом такого подхода является определение системообразующего фактора [12]. Предложенная в [12] схема демонстрирует непрерывность исследовательского процесса, обеспечивающего непосредственный переход от системного уровня к тонким физиологическим деталям системы до молекулярного уровня включительно (рисунок).

Аналогичный подход применяют при рассмотрении отдельных элементов биотехнологической системы (БТС), определяемых с позиции системного анализа как сложные системы [13]. Так основной технический



Схематическое изображение «концептуального моста» между системным уровнем и аналитическими процессами [12]:

а – уровень целостной системной деятельности; б – уровень тонких аналитических процессов; в – путь обычных корреляционных отношений; г – включение системообразующего фактора, который объясняет процесс упорядочивания между множеством компонентов системы; д – операциональная архитектура системы и ее узловые механизмы

элемент БТС – биореактор анализируют декомпозицией до уровня эффектов взаимодействия отдельных составляющих процесса биосинтеза: кинетической, массообменной, термодинамической, гидродинамической и последующего синтеза управления режимными параметрами с учетом общего критерия эффективности.

Принадлежность живых систем к классу наиболее сложных и динамичных в настоящее время общепризнано. Основными при определении и описании сложных систем, к числу которых относятся биосистемы, служат понятия управления и цели функционирования. Действие регулирующих механизмов в клетке, также как и в технических системах, происходит по принципу обратной связи. Под внутриклеточными управлениями понимаются процессы биохимического, физико-химического и другого характера, приводящие скорости процессов в соответствии с общей целью функционирования клетки. В качестве целевой функции клетки принимают максимизацию удельной скорости роста биомассы [14,15]:

$$\frac{1}{x} \frac{dx}{dt} \rightarrow \frac{\max}{\bar{U}},$$

где x – биомасса; t – время; U – вектор внутренних управлений клетки.

Следующей важной целью живого организма является необходимость поддержания постоянства условий (концентраций, состава и др.) внутри организма при изменении окружающей среды. Понятие сбалансированности роста сформулировано для экспоненциальной фазы роста

микроорганизмов, когда ввиду относительного постоянства условий среды не происходит смены факторов, лимитирующих рост. В этой фазе рост осуществляется по экспоненциальному закону и описывается кинетическими зависимостями единственной лимитирующей ферментативной реакций, а состав и количественное соотношение внутриклеточных веществ сохраняют относительное постоянство. Рост при этом описывается уравнением

$$\frac{1}{x} \frac{dx}{dt} = a^T \bar{y} \quad (1)$$

и также сбалансирован. Матрица a^T определяет качественный состав биомассы. Количественное соотношение компонентов биомассы зависит от значений элементов вектора \bar{y} – вектора удельных скоростей образования продуктов реакций. С учетом этого целевую функцию клетки можно записать в виде

$$J = \max \left(\frac{1}{x} \frac{dx}{dt} \right) = a^T \max_{\bar{U}} \{ \bar{y} \},$$

где условие сбалансированности роста выступает как основное ограничение.

Таким образом, можно считать, что в соответствии с широким применением системного подхода к биологическим, биотехническим и микробиологическим системам, результат системной целенаправленной деятельности как решающий самоорганизующий фактор системы может быть рассмотрен в качестве системообразующего фактора, т.е. фактора, который формирует систему, обеспечивает её идентификацию,

функционирование, развитие, целостность, структуру и форму. Трудности в выборе адекватного описания кинетики процесса, которое должно учитывать одновременно протекающие процессы на микроуровне (в клетках), в микробных популяциях и макроуровне (массо- и теплообмен в аппарате, гидродинамическая обстановка и т.п.) характеризуют сложность разработки и использования математических моделей для целей управления.

Динамику биологических процессов можно описывать уравнениями, аналогичными уравнениям химической кинетики. Однако по сравнению с обычной химической кинетикой биологических процессов характеризуется следующими особенностями [14]: в качестве переменных выступают не только концентрации веществ, но и другие величины; переменные изменяются не только во времени, но и в пространстве; биологическая система пространственно гетерогенна и условия взаимодействия реагентов могут быть различны в разных точках системы; существуют специальные механизмы саморегуляции, действующие по принципу обратной связи.

Отмеченные особенности подчеркивают сложный характер функционирования биосистемы и в условиях ее неопределенности. В биологических системах процессы, как правило, существенно нелинейны, так в модели (1), например, правые части уравнений содержат нелинейные члены. В этом случае нахождение точных аналитических решений связано с серьезными математическими трудностями и подчас вообще невозможно. Поэтому основной подход в современной кинетике и математическом моделировании биологических процессов заключается в отказе от нахождения точных аналитических решений дифференциальных уравнений. Упрощение состоит в получении качественных характеристик динамического поведения системы, т.е. в формальном описании переходов между ними с учетом качественной зависимости поведения системы от критических значений параметров и лимитирующих факторов.

Все сложные системы в той или иной степени являются неопределенными. Неопределенности могут быть: экзогенными, определяемыми внешними воздействиями; координатными (не полностью и не точно известен вектор состояния); параметрическими; структурными, связанными с наличием паразитной динамики [16]. Не учитываемые неопределенности ухудшают качество систем управления и могут привести к потере их работоспособности. Поэтому повышение эффективности функциони-

рования современных биотехнологических комплексов приводит к необходимости выявления и учета следующих видов неопределенностей, характерных для процесса управления сложными биосистемами [17]:

1. Низкая точность оперативной информации, получаемой с объектов управления, возникающая ввиду большой погрешности датчиков замера технологических параметров (например, растворенного кислорода и углекислого газа, окислительно-восстановительного потенциала, pH и т.д.), их невысокой надежности, отказов каналов связи, большого запаздывания при получении информации о показателях и параметрах на основе лабораторного анализа периодически отбираемых из биореактора проб, отсутствия возможности замеров параметров во всех точках технологического объекта управления. Наличие такого вида неопределенности вызывает неточность в задании переменных величин в моделях, начальных и граничных условий.

2. Неточность моделей объектов управления, вызванная некорректно проведенной декомпозицией общей задачи управления, излишней идеализацией модели сложного процесса, разрыва существенных связей в технологическом комплексе, линеаризации, дискретизации, замены фактических характеристик оборудования паспортными, нарушения допущений, принятых при выводе уравнений (стационарности, изотермичности, однородности и т.д.).

3. Нечеткость в процессе принятия управленческих решений в системах, обусловленная тем, что процедура принятия решения базируется на неполной информации, включая качественную.

4. Неточность моделей, вызванная высокой вариабельностью показателей и параметров исходной среды, поступающей в биореактор, культуральной жидкости в биореакторе в различные моменты функционирования биотехнологического объекта управления. Известно [18, 19], что в сложных биотехнологических системах медицинской и микробиологической промышленности вариабельность параметров и биохимических показателей сырья составляет, например, на входе в биореактор объемом 50 м^3 от 3,1 до 11,1 % для биосинтеза пенициллина, от 3,7 до 14,5 % для биосинтеза энтобактрина, от 11,8 до 27,2 % для биосинтеза лизина в промышленном биореакторе объемом 100 м^3 . Крайне вариабельно также соотношение элементов в клетках [20].

5. Особенности решения задач в реальном масштабе времени приводят к тому, что недостаток вычислительных возможностей

и статистических методов решения (несоответствие вычислительных ресурсов и методов сложности решаемой задачи) эквивалентен, в некотором смысле, недостатку информации об условиях задачи.

6. Неопределенность проявляется при агрегации правил и моделей, исходящих от разных источников знаний или от диспетчеров различных уровней управления (эти правила и модели могут быть противоречивыми, избыточными и т.п.). Ошибки расчета в основном складывается из ошибки исходных данных, ошибки модели и ошибки метода решения (численного метода). Так, например, в сложных системах энергетики соотношение между составляющими ошибки для установившихся режимов составляют из-за неточности исходных данных – 82–84%, из-за неточности модели – 14–15%, из-за неточности метода – 2–3% [21]. Ввиду такой большой доли погрешности исходных данных, возникает и погрешность в расчете целевой функции, что приводит к значительной неопределенности при выборе оптимального режима работы системы.

При наличии границ неопределенностей параметров используют эту информацию с применением в САУ регуляторов, связанных с интервальной моделью. При отсутствии данных об этих границах применяют регуляторы, синтезированные методом гарантирующего управления, либо робастные и адаптивные регуляторы. Адаптивные алгоритмы могут быть намного сложнее алгоритмов робастного управления и поэтому робастный подход к синтезу систем управления объектами с неопределенностью следует рассматривать в качестве альтернативного адаптивному. Методы робастного управления изучались во многих работах. Самые общие результаты в этой области, как отмечается в [22], получены для стационарных систем, оптимизируемых на бесконечном интервале. Однако распространенная на практике задача робастного управления динамическими биосистемами с параметрической неопределенностью не исследована достаточно полно.

Отмеченные выше особенности свидетельствуют о том, что для повышения требований к качеству работы биообъектов, а именно, его устойчивости, надежности, расширения его функциональных возможностей необходим поиск принципиально новых путей совершенствования процесса управления, учитывающих неопределенный, нечеткий характер БТО и сложные взаимосвязи в процессе их функционирования. Необходимость управления системой в этих условиях затрудняет использование стандартных принципов управления.

Особенно сложным является получение моделей, адекватных объекту при смене режимов работы технологического оборудования, так как задание жестких (четких) ограничений для систем управления приводят к невозможности оптимизации этих систем. Одной из основных проблем на сегодняшний день остается построение динамических моделей физико-химических процессов, отличительной особенностью которых является отсутствие полной и подробной информации о всех взаимодействиях отдельных составляющих (кинетической, массообменной, термодинамической, гидродинамической) процесса биосинтеза. Эти особенности биотехнологических систем приводят к априорной неопределенности и нечеткости моделей процессов. При этом главными источниками проявления неопределенности в задачах управления биотехнологическими объектами являются следующие основные факторы:

- сложность формализованного описания биотехнологического объекта и задач управления;

- нестационарность параметров биотехнологического объекта;

- невысокая воспроизводимость процесса ферментации, обусловленная наличием неизученных характеристик посевного материала, питательной среды и самого процесса;

- априорная неопределенность обстановки и условий функционирования процесса ферментации и системы управления.

Высокий уровень сложности задачи управления приводит к необходимости качественного анализа поведения биопроцессов и обуславливает использование при построении систем управления приближенных моделей.

Анализ особенностей технологических процессов стадии ферментации как объектов управления

Центральная стадия биофармацевтического и микробиологического производства – ферментация. Под ферментацией понимают процесс, в котором целевой продукт получается как результат жизнедеятельности микроорганизмов, выращиваемых в специальных условиях. Такими продуктами могут быть как простые дрожжи, так и сложные соединения, включая протеины, антибиотики, ферменты или материалы для генной инженерии. В основе процесса ферментации лежит культивирование продуцентов, т.е. выращивание культуры микроорганизмов, клеток высших растений или плесневых грибов. Культура микроорганизмов – это популяция микроорганизмов, выращиваемая в питательной

среде и находящаяся в стадии размножения или закончившая его.

Поскольку в промышленной биотехнологии выделяют два типа процессов ферментации – накопление биомассы и накопление целевых веществ, синтезируемых в ходе роста и последующего развития культуры, то меняется и характер функционирования производства во времени. Биомасса одноклеточных выращивается непрерывным способом в аппаратах хемостатного типа, а все процессы второй группы осуществляются периодически, когда в одном и том же аппарате в производственном цикле протекают все необходимые фазы развития клеток и биосинтеза [23]. При непрерывном культивировании нет смены фаз развития культуры, как при периодическом культивировании, и процесс постоянно протекает в экспоненциальной фазе. Учет дифференциации режимов культивирования по фазам при управлении непрерывным процессом не требуется.

Питательная среда перед подачей в ферментатор должна быть стерильной. На этом этапе подготовки субстрата необходимо решить две задачи: полностью уничтожить всю контаминантную микрофлору, которая содержится в необходимом для культивирования объеме жидкости, и сохранить биологическую полноценность питательной среды. Термический метод чаще всего применяется для стерилизации питательных сред и оборудования.

Процессы непрерывной стерилизации питательных сред и ферментации являются сложными технологическими объектами управления и имеют ряд отличительных особенностей, которые необходимо учитывать при решении задач управления. Отметим некоторые из них.

1. Наличие большого числа неконтролируемых воздействий (возмущений), часть из которых генерируется в ходе протекания самих процессов ферментации (например, тепловыделение, потребление кислорода, изменение гидродинамической обстановки в аппарате и т.п.), влияющих на выходные (или косвенные) переменные.

2. Сложный характер зависимостей между входными и выходными переменными. Как правило, для большинства процессов ферментации отсутствует полное априорное математическое описание, что существенно усложняет управление процессом. Так как применение нелинейных моделей в системах управления ограничено, то обычно осуществляют разбиение всего процесса на ряд линейных и квазистационарных участков, для которых строят линейные математические модели. Такой

подход при решении задач стабилизации режимных параметров процессов ферментации в ряде случаев дает удовлетворительные практические результаты.

3. Существенное изменение во времени статических и динамических характеристик. В этих условиях для повышения качества управления процессом использование классических регуляторов (т.е. регуляторов с постоянными коэффициентами) малоэффективно. Это является одной из причин построения адаптивных либо эквивалентных им систем для управления существенно нестационарными объектами стадии ферментации.

4. Большая инерционность процессов ферментации и запаздывание в каналах управления. Это приводит к тому, что выходные переменные в данный момент зависят не только от настоящих, но и от предыдущих значений входных воздействий. Основное требование к алгоритмам управления, применяемым для управления динамическими объектами, заключается в том, что при приложении данного управляющего воздействия выходная переменная должна изменяться быстрее, чем она изменялась бы при действии возмущения. Именно запаздывание в каналах управления и наличие возмущающих воздействий на входе объектов обуславливает применение для управления процессами ферментации каскадных САУ.

6. Ограниченное число паростерилизуемых датчиков и измерительных устройств. Это связано как с необходимостью соблюдения условий стерильности, недостаточной изученностью процессов, протекающих в аппаратах стадии, так и с невозможностью теоретически измерить данную переменную, потому что она не имеет физического смысла. Особенно актуальна эта задача при измерении температуры среды на выходе выдерживателя УНС и при разработке систем управления технологическими объектами с применением динамических моделей в пространстве состояний.

Принимая во внимание перечисленные особенности, решение задач синтеза и анализа САУ процессами стерилизации и ферментации продолжает оставаться актуальной и занимает значительное место при разработке прикладного математического обеспечения АСУ ТП. Использование в реальных системах слишком сложных математических моделей лишает их гибкости и универсальности, затрудняет их применение, требует применения быстродействующих вычислительных средств. Для построения детерминированных моделей биотехнологических процессов можно

применять законы термодинамики, тепло- и массопереноса, кинетики [9]. Ввиду сложности и многообразия процессов, протекающих в биотехнологических комплексах, а также в связи с большим числом составляющих их элементов методы построения моделей на основе физико-химических закономерностей процессов часто оказываются малоэффективными.

В связи с применением вычислительной техники в контурах управления широкое распространение получило представление объектов в пространстве состояний. Но такое представление биотехнологических процессов требует разработки методов оценки переменных состояния, так как не все компоненты вектора можно измерить, а некоторые из них не имеют физического смысла. Это является недостатком моделей в пространстве состояний.

До настоящего времени в прикладной биотехнологии наибольшее применение нашли методы и алгоритмы управления, основанные на строгой формализации проблемы и наличии количественных оценок по определяющим параметрам [24]. Однако эти методы неприменимы для управления нестационарными БТО и решения задач принятия решений при выборе алгоритмического обеспечения систем управления, строгая формализация функционирования которых с помощью числовых моделей невозможна. Характерной особенностью решения подобных задач является большой удельный вес качественной информации и связанная с этим информационная неопределенность и противоречивость суждений экспертов, принимающих управленческие решения, что позволяет выделить объекты прикладной биотехнологии в класс нечетких систем. Основой построения систем управления подобными объектами и методики поддержки принятия решений является теория нечетких систем и аппарат нечеткой логики. Процесс принятия управленческих решений в условиях функционирования нечетких систем основан на анализе текущей информации, оценки альтернатив и выбора рационального варианта управления с учетом неполной, а иногда противоречивой информации.

В работе [25] показана необходимость учета информационной неопределенности при моделировании технологических процессов при брожении полуфабрикатов хлебопекарного производства. Для решения этой задачи в первом приближении предложены математические модели процессов (коллоидных, биохимических и микробиологических), протекающих при брожении.

Возрастающие требования к управлению процессами ферментации, требуют учета существенной нестационарности, нелинейности, невысокой воспроизводимости процессов ферментации биотехнологических производств и способствуют проявлению их сложного характера и отнесению их к сложным системам, ограничивают применение классических методов управления особенно в тех случаях, когда решение должно быть получено в условиях неполноты информации о динамике объекта и действующих на него возмущениях. Ремиконты и микро-ЭВМ позволяют реализовывать более сложные алгоритмы управления и законы регулирования по отношению к традиционным регуляторам. Однако, примеров практического применения интеллектуальных методов и алгоритмов для реализации эффективных систем управления БТО невелико. Алгоритмическое обеспечение систем на нижнем иерархическом уровне АСУТП ферментации, создаваемых на базе нечетких регуляторов и нейросетевых технологий, представляет собой наименее проработанную часть АСУТП. Это обстоятельство во многом обусловлено тем, что применение интеллектуальных методов для синтеза систем управления промышленными БТО до настоящего времени не исследовано.

Таким образом, в настоящее время проблеме синтеза систем управления биотехнологическими объектами по измерениям выходной переменной посвящено большое количество статей и диссертаций. Во многом это объясняется тем, что в этом случае пропадает необходимость использования большого количества датчиков, которые измеряют вектор состояния проектируемой системы и вносят дополнительные погрешности, связанные с ошибками измерений и дополнительными возмущениями (шумы измерений). При проектировании системы управления БТО в ряде случаев невозможно установить датчики (особенно паростерилизуемые), позволяющие измерить ряд переменных состояния системы, либо производные выходной переменной. Несмотря на то, что методы адаптивного управления параметрически неопределенными системами достаточно развиты, следует отметить, что предлагаемые схемы адаптивного управления зачастую обладают высокой размерностью, а также используют сложный математический аппарат, что усложняет их инженерное использование. В связи с этим, проблема синтеза систем управления, обладающих простой структурой и малой размерностью, способных функционировать в условиях неопределенности математического описания объекта управления,

остается открытой. Известны многочисленные примеры решения задач синтеза систем сложными технологическими и техническими объектами на основе применения методов нечеткой логики и нейронных сетей.

В связи с этим возникает необходимость обобщить и систематизировать возможности названного класса систем, особенности их построения и функционирования для управления биотехнологическими объектами, которые относятся к сложным системам. Учитывая сложный характер затронутой проблемы и разнообразие имеющихся на сегодня подходов к ее решению, ограничимся рассмотрением лишь одного из возможных подходов (направлений), которое считается многообещающим с точки зрения создания высокоэффективных САУ нового поколения – это методы управления сложными объектами в условиях неопределенности с использованием алгоритмов нечеткой логики и нейросетевой технологии. Под неопределенностью в данном случае понимается неопределенность, обусловленная как недостатком информации, необходимой для получения количественного описания протекающих в системе процессов, так и сложностью объекта управления. Обоснованием выбора данного круга рассматриваемых алгоритмов явились: наглядность и вместе с тем нетрадиционность, нешаблонность постановки задачи управления; корректность и доступность применяемого математического аппарата; понятная интерпретация и достаточная простота реализации полученных результатов.

Анализ методов и алгоритмов решения задач синтеза систем управления процессами ферментации на основе нечеткой логики

Нечёткое управление (Fuzzy Control, Fuzzy-управление) является одной из перспективных интеллектуальных технологий, позволяющих создавать высококачественные системы управления [26]. Под нечёткими САУ понимаются системы управления, содержащие структурно блоки нечёткого логического вывода. Указанные блоки представляют собой нелинейные звенья, операторы которых определяются базой знаний, состоящих из нечётких продукционных правил, и используемым алгоритмом нечёткого логического вывода. К достоинствам таких систем можно отнести: возможность использования для сложных процессов, когда нет простой математической модели; экспертные знания об объекте управления или процессе можно сформулировать в словесной форме; простота структуры; свойство робастности или адаптивности.

Эффективность систем нечеткой логики базируется на следующих результатах [27]:

1. В 1992 г. Ванг (Wang) доказал теорему: для каждой вещественной непрерывной функции $G(x)$, заданной на компакте U и для произвольного $\varepsilon > 0$, существует нечеткая экспертная система, формирующая выходную функцию $F(x)$ такую, что

$$\sup_{x \in U} \| F(x) - G(x) \| \leq \varepsilon,$$

где $\| \cdot \|$ – символ нормы. Иными словами, для каждой вещественной непрерывной функции $G(x)$ можно построить нечеткий аппроксиматор с заданной ошибкой аппроксимации.

2. Согласно теореме FAT (Fuzzy Approximation Theorem), доказанной Б. Коско (B. Kosco) в 1993 г., любая математическая система может быть аппроксимирована системой, основанной на нечеткой логике.

Системы с нечеткой логикой целесообразно применять для сложных процессов, каковыми являются процессы ферментации, не допускающих построение «обычных» прогностических динамических моделей, а также в тех случаях, когда экспертные знания об объекте или о процессе можно формализовать. Именно такие применения особенно актуальны для биомедицинских информационных систем.

Для стабилизации температуры в ферментаторе в [28] рассмотрено применение нечеткого регулятора, формирующего сигнал на изменение расхода охлаждающей жидкости на основе пяти нечетких правил вида «если... то...» и сделан вывод о том, что нечеткий логический регулятор действует лучше, чем классический ПИД-регулятор. Однако сделанный вывод не подкреплен экспериментальными данными промышленного процесса и качественными оценками и поэтому не является корректным.

Функциональная структура системы управления биотехнологической системой с использованием сформированной нечеткой модели процесса, учитывающей качественные параметры, определяемые по лабораторным анализам, предложена в работе [29].

В [30] предлагается нечеткая система управления, оперирующая при стабилизации температурного режима ферментатора такой оценкой тепловыделения как концентрация микроорганизмов в единице питательного раствора N . Для нечеткой системы управления, по мнению авторов, достаточно будет интерпретировать концентрацию микроорганизмов N в понятиях «малая», «средняя», «большая», что вполне возможно даже при достаточно низкой точности

измерения N . Однако однозначной зависимости между концентрацией N и тепловыделением процесса ферментации не существует, что делает предлагаемую оценку весьма приближенной.

Часто стандартное ферментационное оборудование не обеспечивает технические возможности для надлежащего управления технологическим процессом. Исключение составляет интеллектуальный контроллер ферментации с широким сенсорным экраном, используемый в Южно-Корейском лабораторном оборудовании Liflus GX I [31]. Однако регулирование температуры, рН, pO_2 осуществляется традиционными ПИД-контроллерами.

Отмечено [32], что нечеткие регуляторы в системах управления биотехнологическими процессами позволяют уменьшить ошибки в переходных и установившихся режимах и реализовать более высокие требования процесса за счет управления. Кроме того, используя методы синтеза нечетких алгоритмов управления, можно выполнить оптимизацию сложных контуров регулирования без проведения всесторонних математических исследований [33].

В работе [34] сравнивается качество регулирования температуры в емкости с линейным и нечетким пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) регуляторами и отмечается, что в ряде случаев применение нечеткого ПИД-регулятора может оказаться более целесообразным, чем линейного ПИД-регулятора.

Нечёткая система управления формирует либо управляющие сигналы, либо сигналы с нечёткой системы управляют параметрами классических регуляторов САУ. В работе [35] построены двухуровневые нечетко-логические системы автоматического управления. На нижнем уровне таких САУ используются традиционные ПИД-регуляторы, а на верхнем – нечеткие системы, названные супервизорами, корректирующие параметры регуляторов нижнего уровня в зависимости от процессов, протекающих в системе, придавая ей свойства адаптивности или робастности. В основу функционирования нечеткого супервизорного регулятора положен алгоритм нечеткого логического вывода Сугэно нулевого порядка.

В работах [36, 37] показано, что простая замена классического ПИД-регулятора на нечёткий регулятор не решает задачу построения регулятора с простым механизмом подстройки, что связано с достаточно трудоёмким процессом периодической подстройки нечёткого регулятора (изменение количества правил-термов, весов этих правил и т.д.).

В работе [38] предложен нечеткий регулятор с тремя входами, включенный на параллельную коррекцию параметра И-регулятора при возникновении контролируемых и неконтролируемых возмущений.

Выбору оптимальных алгоритмов систем регулирования в условиях нечеткой информации посвящена работа [39], в которой разработан фаззи-алгоритм типа Такаги-Сугено, гарантирующий определенный запас устойчивости для всех вероятных моделей объекта.

Используемые нечеткие системы различаются формой функции принадлежности выходных переменных (линейная, колоколообразная, треугольная, трапециевидная, двухсторонняя кривая Гаусса и др.). Выбор функций принадлежности лингвистических переменных и формирование базы правил в большинстве работ производится методом проб и ошибок, что занимает достаточно много времени и не всегда эффективно. В [40] проведено исследование влияния базы правил нечеткого регулятора на вид переходного процесса в замкнутой системе управления. По результатам исследования осуществляется выбор той или иной функции принадлежности, исходя из заданного запаса устойчивости системы.

Известно, что большое количество нечетких правил может вызывать «паралич» сигнала управления. Поэтому в [41] предлагается осуществлять декомпозицию сложной базы на относительно простые составляющие, а затем преобразовывать их сигналы в общий сигнал управления. Однако в условиях неопределенности трудно оценить минимальную структуру базы и получить правило согласования сигналов управления для выработки общего сигнала управления, т.е. свойство универсальности данной методики не очевидно. Это означает, что определенная база правил для одного объекта не является рациональной для объектов, которые имеют подобные характеристики.

В тех случаях, когда информация о системе, ее параметрах, а также входах и выходах и состояниях системы является неполной либо слабоформализуемой, исходный набор нечетких правил, формируемый экспертом, может оказаться неполным или противоречивым. Поэтому в силу этих причин в работе [42] предлагается при использовании классического пропорционального П-регулятора во внутреннем контуре применить нечеткую логику для подстройки коэффициентов регулятора внешнего контура, что обеспечивает «живучесть» системы при указанном недостатке нечетких регуляторов.

Результаты решения задачи построения нечеткого регулятора потока субстрата в био-реактор с использованием ANFIS и системы нечеткого вывода Сугено нулевого порядка позволяют отметить, что наиболее эффективным при синтезе нечеткого регулятора потока субстрата является использование гауссовских функций принадлежности при трех правилах разложения по каждому входу [43, 44]. При высоких скоростях разбавления, обуславливающих быстрое и резкое изменение концентрации биомассы, в качестве входной лингвистической переменной нечеткого регулятора целесообразно дополнительно использовать концентрацию биомассы в аппарате, что способствует улучшению характеристик нечеткого регулятора. Такой подход позволяет автоматически настраивать регуляторы потоков и формировать управляющие воздействия в зависимости от концентрации лимитирующего субстрата, концентрации биомассы и уровня в ферментаторе, обобщая информацию о скорости роста микроорганизмов.

В работе [45] реализован подход к синтезу системы управления БТО, основанный на использовании нечеткой логики для параметрической коррекции настройки регулятора системы с аппроксимирующей нелинейной функцией управления (АНФ-регулятора). Кроме того, при стабилизации статического объекта дополнительно использован интегратор с переменным коэффициентом интегрирования, что обеспечивает повышение точности [46]. Весьма существенной особенностью комбинированного применения нечеткого регулятора и интегратора является то, что для реализации астатических свойств системы достаточно скорректировать настройку интегратора, а структуру нечеткого АНФ-регулятора оставить без изменения. Нечеткий АНФ-регулятор имеет следующие преимущества: достаточным является настройка только одного параметра; нет необходимости в точном определении параметров объекта управления; не требуется расширение базы правил для получения качественных переходных процессов в системе стабилизации и в программной системе управления.

Дополнительная возможность повышения эффективности нечеткого управления за счет использования двух фаззи-блоков с различным количеством термов, последовательно реализуемых в зависимости от состояния переходного процесса в системе, показана в работах [47, 48]. Причем в первом фаззи-блоке размещено меньшее количество продукционных правил, отработка которых занимает меньше времени, чем во втором фаззи-блоке, который срабатывает только после оценки состояния переходного процесса

и необходимости его улучшения. В результате исследования переходных процессов по каналу управления «расход хладагента – температура в ферментаторе» установлено, что подбором условий переключения баз правил можно получить монотонные переходные процессы и процессы без существенного перерегулирования с приемлемым временем регулирования. Следует отметить, что в классических нечетких регуляторах такая возможность отсутствует.

В развитых странах мира интенсивно ведутся работы по практическому внедрению нечетких контроллеров и регуляторов, по созданию интеллектуальных систем управления на их основе, экспертных систем с нечеткой логикой в промышленную и непромышленную сферу. К настоящему времени известно более 400 практических применений нечетких контроллеров и систем управления. По мнению экспертов, в ближайшие годы около 70% всех разработок по интеллектуальным системам будут основываться на нечеткой логике [49].

В заключение процитируем слова основоположника и пропагандиста теории нечетких множеств профессора Л.А. Заде [50]: «В последующие годы нечеткие алгоритмы и стратегии управления будут завоевывать, хотя, возможно, и против желания, все большее признание. Они должны быть приняты и должны приобрести некоторую респектабельность, так как обычные «четкие» алгоритмы не могут в общем случае справиться со сложностью и плохой определенностью больших систем. Для того чтобы создать благоприятную среду для развития нечетких алгоритмов, теория управления должна меньше значения придавать математической строгости и точности и больше заботиться о развитии качественных и приближенных решений насущных проблем реального мира. Такая теория может оказаться гораздо богаче и увлекательнее, чем теория управления в настоящее время».

Анализ нечетких регуляторов и принципов их построения применительно к задачам управления процессами ферментации выявил следующее:

- применение нечетких регуляторов позволяет использовать для управления технологическими процессами информацию качественного характера, которую невозможно формализовать при реализации традиционных законов регулирования параметров процесса роста микроорганизмов и биосинтеза;
- нечеткий регулятор оказывает малочувствительным к возмущениям в достаточно широком диапазоне и демонстрирует лучшие характеристики по сравнению с классическими и регуляторами;

– для составления базы правил нечеткого регулятора требуется экспертная информация и хорошее знание влияния параметров и структуры управляющих устройств для управления нестационарными объектами с запаздыванием, вследствие чего в литературе практически отсутствуют методики для непосредственного синтеза нечетких регуляторов;

– существующие нечеткие регуляторы настраиваются на логику пользователя при помощи изменения функций принадлежности, причем выбор функций принадлежности является нетривиальной процедурой;

– не определена возможность и не существует однозначных рекомендаций по выбору нечетких регуляторов для внутреннего и внешнего контуров каскадных САУ процессом ферментации и в совместном их использовании с традиционными регуляторами при построении таких САУ.

Для решения задачи синтеза управления методами нечеткой логики необходимо знать правила, по которым из входных данных можно получить выходные (найти решение задачи). С помощью технологии нейронных сетей можно найти решение, не зная правил, а имея несколько примеров. Рассмотрим методы и алгоритмы решения задач синтеза систем управления на основе нейросетевых технологий.

Анализ методов и алгоритмов решения задач синтеза систем управления процессами ферментации на основе нейросетевых технологий

Использование нейросетевого подхода не требует формального математического описания законов изменения состояния управляемого объекта, а предполагает наличие представительного набора образцов экспериментальных данных для обучения системы управления свойствам имеющихся экспериментальных данных.

Обучение нейронных сетей (НС) является первоначальным этапом идентификации нейросетевой модели (НСМ) [51]. При отсутствии ограничений на вычислительные и временные затраты обучения нейросетевой модели в работе [52] показана целесообразность многоэтапной процедуры обучения линейной динамической модели на базе многослойной нейронной сети прямого распространения. На начальном этапе обучения, когда точность обучения не имеет определяющего значения, рационально использовать алгоритм поиска в случайном направлении, либо алгоритм градиентного спуска с автоматическим определением параметра активности. На втором этапе обучения, когда направление движения поис-

ка определено, целесообразно применять алгоритмы сопряженного градиента Флетчера – Ривса либо Полака – Рибейры. На третьем этапе обучения целесообразно применить алгоритм Левенберга – Марквардта, который обеспечивает большую точность и высокую скорость сходимости вблизи минимума, а, следовательно, позволяет существенно ускорить процедуру обучения. Как показали эксперименты ошибка обучения для алгоритмов обучения градиентного спуска составляет 0,185 за 200 циклов и время 80,2 с; для алгоритмов Флетчера – Ривса – $5,77 \cdot 10^{-4}$ за 200 циклов и время 237,0 с; для алгоритма Левенберга – Марквардта – $3,95 \cdot 10^{-8}$ за 90 циклов и время 112,4 с.

В работах [53, 54] предложен метод решения задачи построения робастной системы управления, основанный на применении в системе нескольких нейросетевых моделей (НСМ) объекта управления, каждая из которых на определенных участках протекания процесса наиболее приближена к фактическому состоянию объекта, и соответствующих им нейросетевых регуляторов, предварительно обученных на основе информации о параметрах модели объекта. Результаты, полученные при исследовании системы программного управления температурой в ферментаторе с многомодульной нейронной сетью, показали следующие преимущества по сравнению с обычной системой с одной НСМ [55]:

1) возможность функционирования системы со структурой, оптимальной для каждого состояния;

2) возможность наращивания структуры системы за счет подключения новых модулей без переобучения имеющихся в системе;

3) возможность реализации в реальном времени.

В работе [56] разработан регулятор стабилизации температуры непрерывного процесса ферментации с использованием адаптивной нейро-нечеткой системы – ANFIS (Adaptive network-based fuzzy inference system). Разработанный нечеткий регулятор обеспечивает требования к стабилизации температуры в ферментаторе при ограничении на управляющее воздействие. Результаты исследований показали, что данная система позволит повысить точность поддержания заданной температуры относительно ПИД-регулятора на 2,1% и снизить пиковый расход хладагента на 43%. При этом обеспечивается робастность к возмущениям по температуре охлаждающей воды и компенсация тепловыделения процесса при ограничении на расход охлаждающей воды и при допустимых температурных рассогласованиях в системе при действии пикового тепловыделения процесса.

Для оптимальной настройки и эффективного функционирования алгоритма системы управления процессом биосинтеза важно иметь информацию о состоянии биосистемы. Получение такой информации с помощью моделей ограничено их сложностью, трудностями идентификации, требующей задания начальных приближений по константам. Существенным фактором в дополнение к вышесказанному является неопределенность в принадлежности области конкретного вида модели зависимостей удельных скоростей процессов синтеза потребления субстрата и удельной скорости роста от концентрации субстрата. В этих условиях определение принадлежности конкретного процесса области лимитированного или нелимитированного роста микроорганизмов возможно с помощью классификатора процессов биосинтеза по степени лимитирования на основе нейроподобной сети Кохонена. В [57] разработана методика нейросетевой классификации процессов биосинтеза по степени лимитирования субстратом в условиях разнородности и фрагментарности массивов данных и, как следствие, ограниченности их содержательного анализа традиционными статистическими методами. Созданная нейронная сеть классификатора отвечает требованиям модульности, адаптивности, инвариантности и однородности структуры.

Следует отметить, что в производственных условиях при частых изменениях нагрузки и наличии внешних не полностью контролируемых возмущений или условий неопределенности параметры БТО подвержены дрейфу, что требует от наладчика введения новых правил в базу знаний нечеткого регулятора. Однако, в силу ограниченности времени, недостаточности средств измерений и опыта, наладчики зачастую не могут предусмотреть все условия поведения системы, что может привести к снижению эффективности работы нечеткой системы. В таких случаях идут либо на усложнение информационной структуры системы [58], примером которой могут служить каскадные САУ с использованием традиционных и модифицированных регуляторов, вплоть до нечетких и нейросетевых [59–64]. Наиболее простыми и распространенными на практике являются двухконтурные САУ, которые включают два регулятора: основной (внешний) регулятор, служащий для регулирования основного выхода объекта, и вспомогательный (внутренний) регулятор, предназначенный для компенсации входных возмущений.

В работах [65, 66] предложены структуры каскадных САУ с использованием

нейросетевых регуляторов на базе многослойных персептронов, обеспечивающие высокие показатели качества переходных процессов в заданном диапазоне изменения режимов работы системы, включая стабилизацию и программный режимы, при одновременном изменении задания регулятору и параметров объекта: в проведенных экспериментах непрерывное изменение коэффициента демпфирования осуществлялось по синусоидальному закону при подаче на вход системы различных по величине ступенчатых воздействий и составляло от 0 до 1 относительно их постоянных значений, принятых при настройке. Экспериментальными исследованиями установлено, что использование нейросетевых регуляторов в контурах каскадной САУ обеспечивает одновременное улучшение нескольких показателей качества переходного процесса при независимой автоматической настройке параметров системы управления, что недостижимо с помощью классических линейных и позиционных регуляторов.

В [67] получено выражение для оптимального значения параметра, при котором скорость сходимости алгоритма управления для нейросетевого ПИД-регулятора нелинейных объектов будет наибольшей.

При обучении трехслойной НС в режиме off-line при синтезе системы управления динамическими объектами ставится вопрос об адаптации параметров регулятора к изменению характеристик объекта [68].

В [69] осуществлен синтез контура подстройки основного регулятора на основе методов нечеткой логики и синтез каскадной САУ БТО с непосредственным включением нейросетевых регуляторов в основной (внешний) и вспомогательный (внутренний) контуры системы. Разработанные каскадные САУ с нейросетевыми регуляторами на основе многослойных персептронов обеспечивают высокие показатели качества переходных процессов в различных режимах работы системы, включая стабилизацию и программный режимы, и при изменяющихся параметрах объекта управления с запаздыванием. Несмотря на то, что топология нейронных сетей, используемых при реализации алгоритмов управления (законов регулирования), выбиралась эмпирически и при этом оказалась достаточно простой, разработанную каскадную САУ динамическим объектом можно считать эквивалентной робастным и адаптивным системам управления.

Подход к построению систем управления на основе комбинации нейросетевой технологии и нечеткой логики применим ко многим существующим системам, так как

во многих случаях улучшение существующих алгоритмов можно произвести с минимальными затратами с использованием существующего программно-аппаратного обеспечения [70]. Однако, несмотря на широкое развитие нейроруавления, вопрос об эффективном применении нейросетевых регуляторов для построения системы управления сложными БТО, обеспечивающей в условиях неопределенности робастность к изменяющимся параметрам объекта управления, остается открытым.

Одним из направлений разрешения противоречия между возрастающими требованиями к управлению биотехнологическими объектами и ограниченной информацией об их свойствах может стать применение аппарата теории интеллектуального управления. Однако применение таких методов интеллектуального управления как нечеткая логика, теория нейронных сетей, нейро-нечеткого (гибридного) управления для синтеза систем управления биообъектами практически не исследовано. Из анализа литературных источников по применению нечетких и нейронных сетей в задачах управления динамическими объектами в условиях неопределенности следует, что большинство работ носит частный или эмпирический характер, результаты по выбору структуры и настройки получены, в основном, подбором и путем многократного моделирования, практически отсутствуют результаты синтеза нечетких и нейро-нечетких систем управления процессами стерилизации и ферментации. Эффективное совмещение методов нечеткой логики и нейросетевой технологии позволяет формировать модели сложных формализуемых процессов поддержки управленческих решений. Нейро-нечеткие системы особенно эффективны в сложных нелинейных процессах управления с параметрическими неопределенностями.

Основными недостатками экспертных регуляторов, основанных на нечеткой логике, являются, прежде всего, субъективность выбора набора правил и параметров функций принадлежности входных переменных, а также сложность корректировки этих параметров на основе экспериментальных данных, особенно проявляющаяся при недостатке информации о характеристиках возмущений и объекта управления, т.е. в условиях неопределенности. Эти недостатки можно устранить или ослабить их влияние применением нейро-нечетких регуляторов, объединяющих в себе лучшие качества нейронных сетей и нечетких систем.

Управление процессом ферментации традиционными системами неэффективно, так как эти системы настраиваются только

при разработке. Для эффективного управления процессом необходимо использовать адаптивную систему, которая позволит изменять свои характеристики в соответствии с изменениями свойств объекта управления. Одним из эффективных вариантов адаптивной системы управления служит нейро-нечеткая система управления. Нейро-нечеткие системы управления отличаются от классических тем, что алгоритм их функционирования в начале работы не определен, и полностью задается при их настройке путем обучения.

Как показывает анализ работ, количество разработок в области применения интеллектуальных методов для систем управления промышленными процессами ферментации незначительно. С появлением аналогичных разработок для технических и технологических систем в ближайшие годы следует ожидать все большего их применения для целей управления процессами ферментации, что делает естественным реализацию функций регулирования режимных параметров существенно нестационарных процессов ферментации на качественно новом уровне. С учетом изложенного наиболее перспективным путем промышленной автоматизации процессов ферментации в биотехнологическом производстве является создание алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления на базе интеллектуальных методов. Основное направление исследований должно состоять в разработке более совершенных САУ процессом ферментации, обеспечивающих реализацию задач оптимального управления и учитывающих важную специфическую особенность этого класса промышленных объектов – их существенную нестационарность, запаздывание, нелинейность, невысокую воспроизводимость и другие факторы, создающие неопределенность в математическом описании БТОУ. Эта тенденция обусловлена экономическими факторами развития этих производств, а поэтому является весьма устойчивой [71].

Выводы

1. Повышение эффективности фармацевтических и микробиологических производств связано с разработкой САУ процессами стерилизации и ферментации, требующей при отсутствии полного и точного математического описания динамики процессов применения интеллектуальных методов при синтезе алгоритмов управления и регулирования.

2. Анализ существующего состояния управления процессами стадии ферментации показывает, что вопросам синтеза САУ

БТО в условиях информационной неопределённости, с учётом физико-химических, биофизических, биохимических закономерностей и нечётких причинно-следственных связей не уделялось должного внимания, в то время как в технических областях они давно получили решение, эффективное по отношению к результатам, полученным на основе традиционных решений.

3. Количество работ, в которых решаются задачи с применением интеллектуальных систем для целей робастного и адаптивного управления нестационарными биотехнологическими объектами и процессами в условиях неопределённости, невелико, что свидетельствует об отсутствии их окончательного решения и придает этим работам в настоящее время все большую актуальность и востребованность на практике.

4. Из анализа литературных источников по применению нечетких и нейронных сетей в задачах управления биотехнологическими объектами в условиях неопределённости следует, что большинство работ носит частный или эмпирический характер, результаты по выбору структуры и настройки регуляторов получены, в основном, подбором и путем многократного моделирования, практически отсутствуют результаты синтеза нейро-нечетких систем управления процессами ферментации и стерилизации и рекомендации по их достижению.

5. Решение задач разработки методов управления движением нелинейных систем, в частности выводом на заданный режим, управление потоками субстратов и отбором продуктов, и методов стабилизации в детерминированном случае и при наличии неопределённости связано с серьезными затруднениями в виду специфики объектов промышленной биотехнологии и необходимости одновременного учета целого ряда разнообразных факторов неопределённости, практически не позволяющих сформировать в замкнутой аналитической форме алгоритмы функционирования САУ БТО с требуемыми показателями эффективности. В связи с этим внедрение интеллектуальных методов в теорию и практику автоматического управления сложными, нелинейными биотехнологическими объектами является весьма перспективным.

Список литературы

1. Солдатенков, А.Т. Основы органической химии лекарственных веществ / А.Т. Солдатенков, Н.М. Колядина, И.В. Шендрик. – М.: Химия, 2001. – 188 с.
2. Лубенцов В.Ф. Системы автоматического управления процессами ферментации: монография. – Сев.-Кав. гос. техн. ун-т. Ставрополь: СевКавГТУ, 2005. – 200 с.
3. Программа «БИО-2020». – URL: <http://rosbiotech.com/news/view.php?ID=45> (дата обращения: 03.06.2012).
4. Островский Ю.В. Система управления производством субстанций лекарственных препаратов с перенастраиваемой технологией / Ю.В. Островский, Т.Б. Чистякова, А.А. Малин // Химическая промышленность. – 2003. – № 5. – С. 4–18. – URL: www.thesa.ru/chemprom/2003/05_03/ostrov.pdf (дата обращения: 12.12.2015).
5. Медянец Д.В. Нейросетевые информационные системы для автоматизации технологических процессов: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности): автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 22 с.
6. Усков А.А. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика / А.А. Усков, А.В. Кузьмин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 144 с.
7. Гостев В.И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления. – К.: Радиоамастор, 2003. – 512 с.
8. Sefa I. Simulation of fuzzy logic controlled grid interactive inverter / I. Sefa, N. Altin // University of Pitesti – Electronics and computers science. Scientific bulletin. – 2008. – Vol. 2. – № 8.
9. Юсупбеков Н.Р. Управление процессами ферментации с применением микро-ЭВМ / Н.Р. Юсупбеков и др. – Ташкент: Фан., 1987. – 200 с.
10. Оптимизация процесса проектирования биотехнологических производств путем разработки элементов САПР / В.А. Герасименко, Ю.Н. Погребной, Ю.В. Карлаш // Научное сообщество студентов XXI столетия: материалы II Студенческой международной заочной научно-практической конференции (Россия, г. Новосибирск, 16 апреля 2012 г.). – Новосибирск, 2012. – <http://bio-x.ru/articles/optimizaciya-processa-proektirovaniya-biotehnologicheskikh-proizvodstv> (дата обращения: 04.06.2012).
11. Москвин С.В. Системный анализ эффективности управления биологическими системами лазерным излучением: 05.13.01: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Тула: ФГУ «Государственный научный центр лазерной медицины Росздрава», 2008. – 41 с.
12. Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. – 1973. – URL: <http://www.raai.org/library/books/anohin/anohin.htm> (дата обращения: 12.06.2012).
13. Системный подход к анализу процесса биосинтеза. – <http://tweetbot.ru/biotehnologiya-spirta/500-sistemnyy-podhod-k-analizu-processa-biosinteza-chast-3.html> (дата обращения: 13.06.2012).
14. Рубин А.Б. Кинетика биологических процессов / А.Б. Рубин, Н.Ф. Пытьева, Г.Ю. Ризниченко. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 300 с.
15. Ризниченко Н.Ф. Математические модели биологических производственных процессов / Н.Ф. Ризниченко, А.Б. Рубин. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 300 с.
16. Потапенко Е.М. Высокоточное управление неопределёнными объектами. Сравнение методов управления / Е.М. Потапенко, А.Е. Казурова // 36. наук. Праць Дніпродзержинського техн. університету (технічні науки). Тематичний вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 412–414.
17. Анализ видов неопределённости информации, характерных для процесса управления сложными системами. – URL: <http://www.plink.ru/tmm/g111.htm> (дата обращения: 12.08.2011).
18. Лубенцов, В.Ф. Методы динамической идентификации биотехнологических объектов / В.Ф. Лубенцов, Д.В. Болдырев – Ставрополь: СевКавГТУ, 2005. – 84 с.
19. Лубенцов В.Ф. Практический математико-статистический анализ биотехнологических систем. – Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 2000. – 111 с.
20. Фурсова П.В. Дифференциальные уравнения в моделировании сообществ микроорганизмов / П.В. Фурсова,

- А.П. Левич // Успехи современной биологии. – Т. 126. – 2006. – № 2. – С. 149–179.
21. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, Я. Такахара. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
22. Миллер Г.Б. Оптимизация управления в линейных стохастических дифференциальных системах с неопределенными параметрами возмущений / Г.Б. Миллер, А.Р. Панков // Информационные процессы. – 2006. – Т. 6. – № 2. – С. 131–143.
23. Бирюков В.В. Основы промышленной биотехнологии. – М.: Колос С, 2004. – 296 с.
24. Ивашкин Ю.А. Управление нечеткими объектами в прикладной биотехнологии / Ю.А. Ивашкин, И.И. Протопопов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – Вып. № 4. – М.: МГТУ, 1999. – С. 1–3.
25. Злобин Д.Л. Математические модели процессов при брожении полуфабрикатов хлебопекарного производства: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2005. – 121 с.
26. Макаров И.М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов. – Отделение информ. технологий и вычислит. систем РАН. – М.: Наука, 2006. – 333 с.
27. Электронный ресурс. – URL: <http://www.bmt.bmstu.ru/ershov/autodiag.doc> (дата обращения: 13.08.2012).
28. Искандеров Г.М. Нечеткие логические регуляторы в системе управления ферментатором // Вузовская наука – Северо-Кавказскому региону: материалы V региональной НТК. Технические и прикладные науки. Ч. 2. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2001. – С. 32–33.
29. Синтез функциональной структуры системы оптимального управления биотехнологической системой / У.Т. Хаитматов и др. // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XVI Междунар. науч. конф. В 10-и т. Т. 6. Секция 9, 13 / под общ. ред. В.С. Балакирева; РГАСХМ ГОУ. – Ростов н/Д., 2003. – С. 196–197.
30. <http://nrsu.bstu.ru/chap43.html> (дата обращения: 13.08.2012).
31. Liflus GX I (автоклавируемый ферментер). – <http://koreabiotechlab.ru/catalog/9/17.htm> (дата обращения: 13.08.2012).
32. Применение нечеткой логики в управлении биотехнологическими процессами / Б.Т. Каипбергенов, С.Х. Файзуллаев, А.А. Акрамов, А.Е. Исмаилов // Математические методы в технике и технологиях. ММТТ-21. Секция 6. – Саратов, 2008.
33. Куленко М.С., Буренин С.В. Исследование применения нечетких регуляторов в системах управления технологическими процессами // Вестник ИГЭУ. – Вып. 2. – 2010. – С. 1–5.
34. Кудинов Ю.И. Сравнение линейного и нечеткого ПИД-регуляторов / Ю.И. Кудинов, А.Ю. Келина. – URL: http://www.rusnauka.com/13_NMN_2011/Economics/10_83520.doc.htm (дата обращения: 13.08.2012).
35. Воробьев К.А. Использование аппарата нечеткой логики в интересах адаптации системы управления самонаводящихся зенитных управляемых ракет / К.А. Воробьев, И.Н. Хурской // Электронный математический и медико-биологический журнал. – Т. 9. – Вып. 1. – 2010. – URL: <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/N-25.html/cont.htm> (дата обращения: 20.12.2012).
36. Уграватов А.Ю. Применение регуляторов на нечеткой логике // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 9–15.
37. Уграватов А.Ю. Приёмы управления сложными динамическими объектами с применением методов нечеткой логики // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: сборник статей Международной научно-технической конференции. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2008. – С. 105–109.
38. Шидловский С.В. Система автоматического регулирования, инвариантная к параметрическим возмущениям, на базе нечеткой логики // Вестник Томского государственного университета. – 2006. – № 290. – С. 247–250.
39. Роман М.Р. Выбор оптимальных алгоритмов систем регулирования в условиях нечеткой информации: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Магди Рауф Марзук Роман. – М., 2008. – 20 с.
40. Михасев А.Ю. Исследование влияния вида базы правил нечеткого регулятора на вид переходного процесса / А.Ю. Михасев, И.М. Кольцов / Научная сессия МИФИ-2005. – Т. 5. Автоматика. – 2005. – С. 32–33.
41. Бураков М.В. Разработка интеллектуальных систем управления динамическими объектами методом декомпозиции базы знаний / М.В. Бураков, А.С. Коновалов. – URL: <http://www.inftech.webservis.ru/it.conference/isanditc/2000/section2/rus/argus2.html> (дата обращения: 20.08.2012).
42. Масютина Г.В. Синтез и анализ каскадной системы управления с нечетким модифицированным регулятором / Г.В. Масютина, В.Ф. Лубенцов // Вестник СевКавГТУ. Технические науки. – Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ. – 2010. – № 4. – С. 97–103.
43. Володин А.А., Лубенцова Е.В., Лубенцов В.Ф. Построение и исследование нейро-нечетких регуляторов потоков субстрата и продукта для управляемой непрерывной биосистемы // Вестник СКФУ. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2013. – № 3(36). – С. 14–20.
44. Володин А.А., Лубенцова Е.В. Адаптивная нейро-нечеткая система управления биотехнологическим процессом // Инфокоммуникационные технологии в инновациях, медико-биологических и технических науках: сборник научных трудов Пятого международного научного конгресса «Нейробиотелеком-2012». – СПб.: Политехника, 2012. – С. 223–226.
45. Лубенцов В.Ф. Коррекция регуляторов нелинейных систем с использованием нечеткой логики / В.Ф. Лубенцов, Г.В. Масютина // Системный синтез и прикладная синергетика: Международная научная конференция 29.09-02.10.2009 г. Пятигорск. Сб. докладов. – Пятигорск: РИА на КМВ, 2009. – С. 220–223.
46. Масютина Г.В. Астатическое регулирование в нечетких условиях // Материалы XXXIX по итогам работы профессорско-преподавательского состава СевКавГТУ за 2009 год. Том первый. Естественный и точные науки. Технические и прикладные науки. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2010. – С. 52–54.
47. Лубенцов В.Ф. Интеллектуальная система программного управления и робастной стабилизации на основе нечеткой логики / В.Ф. Лубенцов, Г.В. Масютина // XXIII Международная научная конференция. Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23: в 12 т. Т. 6. Секция 6, 7; под общ. ред. В.С. Балакирева. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. – С. 63–65.
48. Лубенцов В.Ф. Интеллектуальная система управления с переменной структурой на основе нечеткой логики // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12 (часть 2) – С. 252–257.
49. Мелихова О.А. Нечеткие интеллектуальные системы. – URL: <http://pitis.tsure.ru/files5/09.htm> (дата обращения: 20.10.2012).
50. Электронный ресурс / <http://texproc.ru/index.php/biblioteka/90-o-intellektualnykh-sistemakh-upravleniya/nechlog/138-map?limitstart=0> (дата обращения: 3.10.2012).
51. Иванов В.А. Математическое моделирование процесса синтеза метанола с помощью искусственных нейронных сетей / В.А. Иванов, И.А. Кудрина // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-2000: сборник трудов международной научной конференции в 7-и томах. Секции 11, 12, 13. Т. 6. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный технологический институт (техн. ун-т), 2000. – С. 141–143.
52. Червяков Н.И. Сравнение алгоритмов обучения нейросетевой модели управления динамическими системами / Н.И. Червяков, Т.А. Рудакова, С.Ю. Щербина // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – М.: Радиотехника, 2008. – № 1–2. – С. 57–63.

53. Рудакова Т.А. Система автоматического управления с многомодульной нейросетевой моделью / Т.А. Рудакова, В.Ф. Лубенцов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21: XXI Международная научная конференция. – Саратов: СГТУ, 2008. – С. 231–232.
54. Червяков Н.И. Нейросетевая система автоматического управления с переменной структурой / Н.И. Червяков, В.Ф. Лубенцов, Т.А. Рудакова // Инфокоммуникационные технологии. – 2008. – № 1. – С. 8–12.
55. Рудакова Т.А. Система автоматического управления с многомодульной нейросетевой моделью / Т.А. Рудакова, В.Ф. Лубенцов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21: XXI Международная научная конференция. – Саратов: СГТУ, 2008. – С. 231–232.
56. Володин А.А. Интеллектуальная система стабилизации температурного режима биопроцесса / А.А. Володин, Е.В. Лубенцова // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: материалы II международной научно-практической конференции. – М., 2013. – С. 117–120.
57. Лубенцова Е.В., Володин А.А., Евдокимов А.А., Лубенцов В.Ф. Нейросетевой классификатор процессов биосинтеза по степени лимитирования субстратом // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. – М.: Изд-во: «Радио-техника», 2013. – № 2. – С. 61–69.
58. Смирнов Н.И. Оптимизация одноконтурных АСУ с многопараметрическими регуляторами / Н.И. Смирнов, В.Р. Сабанин, А.И. Репин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 7. – С. 24–28.
59. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Н.Д. Егупова. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с.
60. Заде Л.А. Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных интеллектуальных систем. – http://zadeh.narod.ru/ZADEH_Rol_mjagkikh_vychislenij.html
61. Городецкий А.Е. Нечеткое математическое моделирование плохо формализуемых процессов и систем / А.Е. Городецкий, И.Л. Тарасова. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2010. – 336 с.
62. Анисимов, Д.Н. Использование нечеткой логики в системах автоматического управления // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2001. – № 8. – С. 39–42.
63. Genetic tuning of non-linear PID-controllers / A.H. Jones, D.W. Pearson, N.C. Steele, R.F. Albrecht // In: Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms. Procs. of the Int. Conf. in Ales, France. – Wien: Springer Verlag, 1995. – P. 412–415.
64. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей: учебное пособие для вузов. Кн. 1. Нейрокомпьютеры и их применение / под ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – С. 356–404.
65. Масютина Г.В. Синтез и анализ каскадной системы управления с нечетким модифицированным регулятором / Г.В. Масютина, В.Ф. Лубенцов // Вестник СевКавГТУ. Технические науки. – Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 2010. – № 4. – С. 97–103.
66. Масютина Г.В. Синтез каскадной САУ с использованием квазирелейных и нейросетевых регуляторов / Г.В. Масютина, В.Ф. Лубенцов // Инфокоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании: четвертая международная научно-техническая конференция, 28–30 июня 2010 г. Ч. 1. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2010. – С. 115–120.
67. Ляшенко С.А. Оптимизация управления сложными технологическими процессами в сахарном производстве на основе применения нейросетевых регуляторов // Вестник ХНТУ. – 2011. – № 2(41). – С. 39–46.
68. Коломейцева М.Б. Применение нейронных сетей в системе управления динамическими объектами / М.Б. Коломейцева, Д.Л. Хо // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-2000: Сб. трудов Международ. науч. конф. В 7-и т. Т. 6. Секции 11, 12, 13. Санкт-Петербургский гос. технол. ин-т (техн. ун-т). – СПб., 2000. – С. 155–156.
69. Масютина Г.В. Синтез робастных систем управления с использованием каскадно-связанных модифицированных нелинейных, нечетких и нейросетевых регуляторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01: защищена 1.12.2011. – Ставрополь, 2011. – 228 с.
70. Колдаев А.И. Разработка нечеткого нейроконтроллера с применением методов вейвлет-преобразований: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Ставрополь, 2012. – 150 с.
71. Андриевская Н.В. Особенности применения нейро-нечетких моделей для задач синтеза систем автоматического управления / Н.В. Андриевская, А.С. Резников, А.А. Черанев // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–7. – С. 1445–1449. – URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10005052 (дата обращения: 07.08.2015).