

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ



УДК 621.365.5

А.А. Багаев, С.О. Бобровский
A.A. Bagayev, S.O. Bobrovskiy

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ ИНДУКЦИОННОЙ ТВЧ УСТАНОВКИ ОТ ТОКА В ИНДУКТОРЕ

THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DEPENDENCE OF THE POWER OF INDUCTION HFC INSTALLATION ON INDUCTOR CURRENT

Ключевые слова: высокочастотная установка, индукционный нагрев, ток в процентах, оценка мощности, индуктор, энергозатраты.

Современным способом восстановления и упрочнения поверхностей рабочих органов сельскохозяйственных агрегатов является индукционный нагрев токами высокой частоты (ТВЧ). В частности, ТВЧ технологии являются предметом и объектом исследования технологических процессов восстановления и упрочнения рабочих органов путем проведения научно-исследовательских работ. Одной из целей проведения указанных работ является решение компромиссной или оптимизационной многофакторной задачи, которая направлена на достижение максимальной твердости обрабатываемой поверхности при минимуме энергозатрат. Оценка и регулирование мощности передаваемой электромагнитным полем высокой частоты нагреваемой детали в единицу времени могут быть проведены в том случае, если известно истинное значение тока в индукторе высокочастотной установки. Проблема заключается в том, что ТВЧ установки типа ЭЛСИТ 100/40-70 позволяют контролировать и визуализировать на индикаторе ток в индукторе исключительно в процентах. Следовательно, в

процентах измеряется и мощность, передаваемая нагреваемой детали. Данный факт в определенной степени затрудняет оптимизацию многофакторного процесса упрочнения поверхностей деталей. Требуется оценивать ток в амперах. Для решения данной проблемы была разработана блок-схема мостового инвертора индукционной ТВЧ установки. С использованием измерительного оборудования схемы произведены измерения фазных (линейных) токов, измеряемых в амперах, активная мощность, потребляемая ТВЧ установкой из сети, и ток в индукторе индукционной установки, выраженный на индикаторе установки ЭЛСИТ в процентах. На основе полученных результатов экспериментальных исследований построены зависимости для определения мощности, потребляемой ТВЧ установкой: экспериментальная зависимость тока питающей сети в амперах от тока, выраженного на индикаторе ТВЧ установки в процентах; зависимость мощности, потребляемой ТВЧ установкой от тока питающей сети; зависимость мощности, потребляемой ТВЧ установкой от тока, выраженного на индикаторе ТВЧ установки в процентах. Для каждой зависимости получены уравнения регрессии. Сделаны соответствующие выводы по данной работе.

Keywords: *high frequency current (HFC) installation, induction heating, current in percentage terms, power evaluation, inductor, energy consumption.*

A modern method of restoring and hardening the surfaces of the working bodies of agricultural implements is induction heating with high frequency currents (HFC). In particular, high-frequency technologies are studied in the context of the technological processes of restoration and hardening of working bodies. One of the goals of this research is to solve a compromise or optimization multifactor task which is aimed at achieving the maximum hardness of the treated surface with minimum energy consumption. The evaluation and regulation of the power transmitted by the electromagnetic field of the high frequency of the heated part per unit of time may be carried out if the true value of the current in the inductor of the high-frequency installation is known. The problem is that the HFC installation ELSIT 100/40-70 allows monitoring and visualizing the current in the inductor on the indicator in percentage terms only. Therefore, in percentage terms, the power transmitted to the heated part is also measured. This

fact to a certain extent makes it difficult to optimize the multifactorial process of hardening the surfaces of parts. It is required to evaluate the current in amperes. To solve this problem, a block diagram of a bridge inverter for an HFC induction installation was developed. Using the measuring equipment of the circuit, the phase (linear) currents were measured in amperes; the active power consumed by the HFC installation from the network, and the current in the inductor of the induction installation expressed on the indicator of the ELSIT installation – in percentage terms. Based on the results of experimental studies, the dependencies were built to determine the power consumed by the HFC installation: the experimental dependence of the supply mains current in amperes on the current expressed in percent on the HFC indicator; the dependence of the power consumed by HFC installation from the current of the supply network; the dependence of the power consumed by the HFC installation from the current expressed on the HFC installation indicator in percent. For each dependency, the regression equations are obtained. The relevant conclusions were made.

Багаев Андрей Алексеевич, д.т.н., проф., зав. каф. «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: Bagayev710@mail.ru.

Бобровский Сергей Олегович, магистрант, каф. «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: sergej.bobrovskij.95@mail.ru.

Bagayev Andrey Alekseyevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Head, Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. E-mail: bagayev710@mail.ru.

Bobrovskiy Sergey Olegovich, master's degree student, Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. E-mail: sergej.bobrovskij.95@mail.ru.

Введение

Массовое производство и, соответственно, снижение стоимости элементной базы современной силовой полупроводниковой техники служат основой для все более широкого ее внедрения в различные технологические процессы, включая установки индукционного нагрева токами высокой частоты (ТВЧ). Достоинствами данного вида нагрева являются возможность организации бесконтактного процесса сквозного или поверхностного нагрева, высокие скорость нагрева обрабатываемых деталей и КПД.

Кроме того, по сравнению с индукционными установками промышленной частоты [1] ТВЧ установки обладают меньшей материалоемкостью, массой и в лучшей степени приспособлены для применения в различных термических процессах, требующих регулирования и автоматизации. На предприятиях, производящих или ремонтирующих сельскохозяйственную технику, индукционный нагрев применяется как в основных технологических процессах изготовления деталей перед последующей горячей деформацией (процессы сквозного нагрева первого типа), так и в

процессах их ремонта и восстановления методами наплавки, металлизации и пайки, поверхностной закалки и др. (процессы поверхностного нагрева второго типа) [2].

В процессах *первого типа*, целью которых является нагрев детали до требуемой температуры горячей деформации, величина энергии, доставляемой в нагреваемую деталь, играет второстепенную роль. Решение этой проблемы не представляет трудностей. Целью процессов *второго типа* является восстановление или упрочнение поверхностного тонкого слоя обрабатываемой детали с заданными показателями твердости при минимуме энергозатрат. В *процессах второго типа* мощность, доставленная в деталь электромагнитным полем (ЭМП) высокой частоты в единицу времени, зависит от химического состава восстанавливающего вещества, температуры его плавления и является определяющей для достижения требуемых показателей качества упрочняемой поверхности и снижения энергозатрат на реализацию.

Таким образом, при проведении исследовательских работ по упрочнению поверхностей ра-

бочих органов сельскохозяйственных машин требуется решать компромиссную или оптимизационную многофакторную задачу. Для оценки мощности, передаваемой ЭМП нагреваемой детали в единицу времени, требуется знать истинное значение тока в индукторе ТВЧ установки с целью его регулирования [2].

Вместе с тем ряд ТВЧ установок измеряют ток в индукторе исключительно в процентах. Следовательно, в процентах измеряется и мощность, передаваемая нагреваемой детали. К таким установкам, в частности, относится установка ЭЛСИТ 100/40-70 номинальной мощностью 100 кВт, частотным диапазоном работы от 40 до 70 кГц, напряжением на индукторе 50 В и током в индукторе 2000 А [3].

Измерение тока в процентах затрудняет оптимизацию многофакторного процесса упрочнения поверхностей деталей. Требуется оценивать ток в амперах.

Проблеме разработке информационно-измерительной системы (ИИС) измерения тока в индукторе ТВЧ установки посвящены работы [4-8].

Результатом работ является следующий вывод: для разработанной ИИС требуется оценка реального тока в индукторе с целью калибровки измеряющего амперметра [4, 5].

По результатам работ [4-8] невыясненным остается следующий факт. Каким образом реальный ток в амперах в индукторе соответствует току в процентах, визуализируемому на дисплее

ЭЛСИТ 100/40-70. В связи с этим открытым остается вопрос о мощности, доставляемой в деталь.

Целью исследования является установление зависимости между током питающей сети (на входе в инвертор ТВЧ установки), выраженном в амперах, и током в индукторе (на выходе из инвертора), выраженном на индикаторе ТВЧ установки в процентах, и соответствующими этим токам мощностями.

Методика и методы исследования

На рисунке 1 представлена блок-схема экспериментальной установки.

Для измерения фазных (линейных) токов в линейных проводах питающей трехфазной сети I_A, I_B, I_C , линейных напряжений U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} , активной мощности, потребляемой ТВЧ установкой из питающей сети, использован измерительный комплект К505 (рис. 2а). Потребляемая ТВЧ установкой мощность определялась как алгебраическая сумма показаний ваттметров pW_1 и pW_2 [9], поскольку к обмоткам напряжения приборов подведено линейное напряжение. Ток в индукторе индукционной ТВЧ установки (рис. 2б) измеряется датчиком тока (ДТ) и визуализируется на индикаторе (рис. 2в).

Повторность опытов трехкратная, доверительная вероятность 0,95, предельная ошибка равна трехкратному среднеквадратическому отклонению [10].

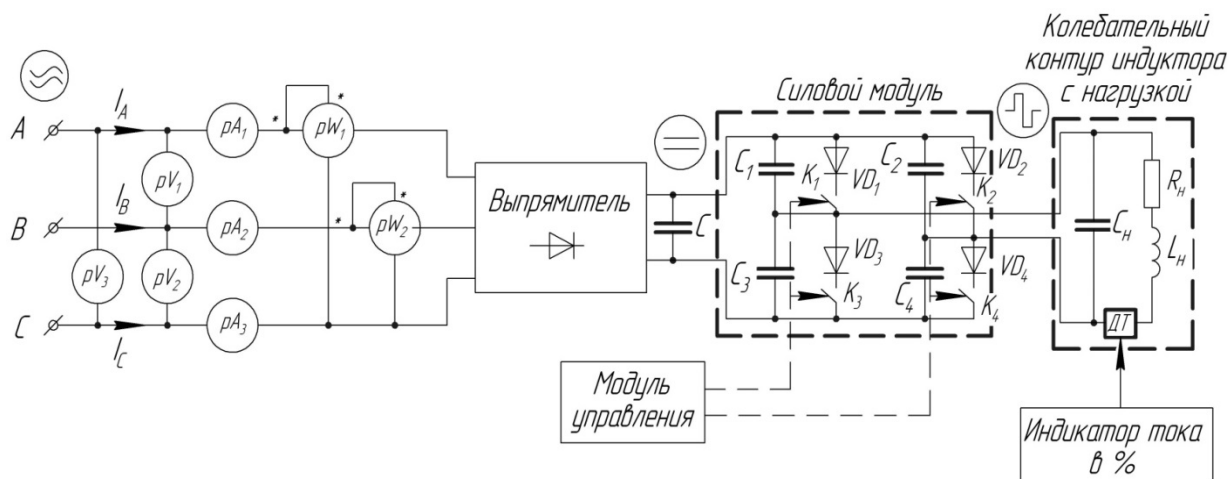


Рис. 1. Блок-схема мостового инвертора индукционной ТВЧ установки: pA_1, \dots, pA_3 – амперметры; pV_1, \dots, pV_3 – вольтметры; pW_1, \dots, pW_2 – ваттметры; C – фильтровой конденсатор; VD_1, \dots, VD_4 – обратные диоды; $K_1 \dots K_4$ – силовые ключи (IGBT-транзисторы); C_1, \dots, C_4 – коммутирующие конденсаторы; ДТ – датчик тока в цепи колебательного RLC-контюра, измеряющий ток в %; C_H – емкость конденсатора колебательного контюра; R_H и L_H – соответственно, активное сопротивление и индуктивность индуктора с нагрузкой



а



б



в

Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки:
 а – распределительный щит и измерительный комплект К505;
 б – общий вид ТВЧ установки ЭЛСИТ 100/40-70; в – индикатор ТВЧ установки ЭЛСИТ

Результаты

экспериментальных исследований

С использованием измерительного оборудования схемы, представленной на рисунке 1, произведены измерения фазных (линейных) токов I_A , I_B , I_C , измеряемых в амперах (А), активная мощность P (Вт), потребляемая ТВЧ установкой из сети, и ток в индукторе индукционной установки, выраженный на индикаторе установки ЭЛСИТ в процентах (%).

Результаты экспериментальных исследований сведены в таблицу 1.

Таблица 1

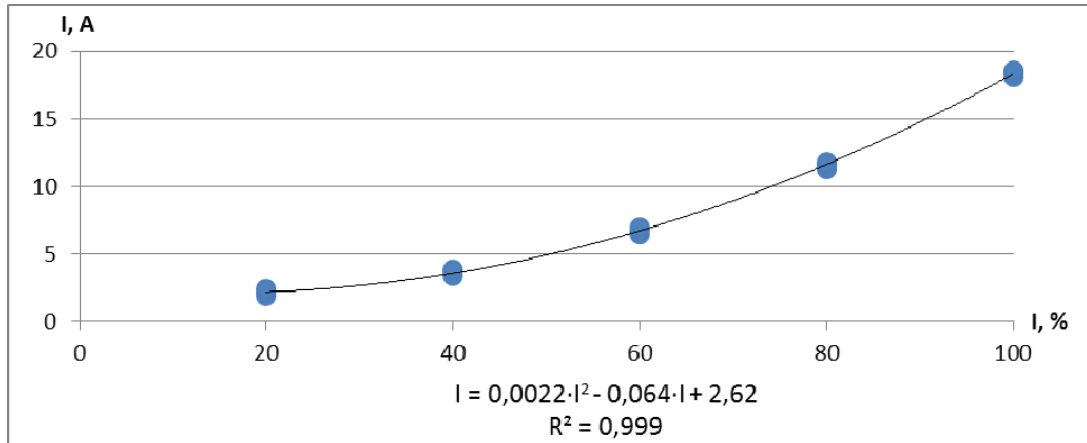
Результаты экспериментальных исследований

Ток нагрузки, %	I, A			$P, кВт$		
	повторность измерений					
	1	2	3	1	2	3
20	1,9	2,2	2,4	1,25	1,45	1,58
40	3,4	3,7	3,9	2,24	2,44	2,57
60	6,5	6,7	7	4,28	4,41	4,61
80	11,3	11,6	11,8	7,44	7,63	7,77
100	18,1	18,4	18,6	11,91	12,11	12,24

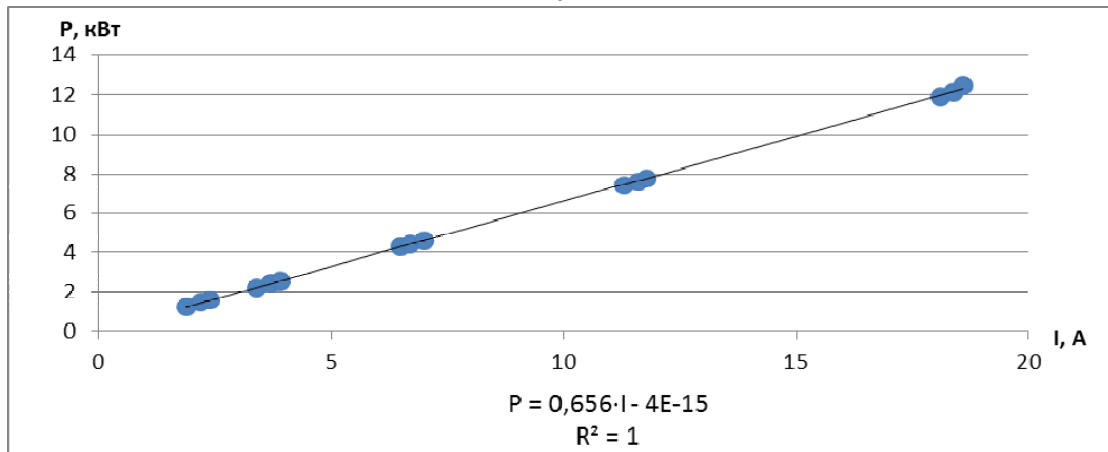
Графическая интерпретация зависимости тока питающей сети I_A в амперах от тока в индукторе $I\%$ в процентах показана на рисунке 3а.

На основе данных таблицы 1 построены зависимости, позволяющие определить мощность,

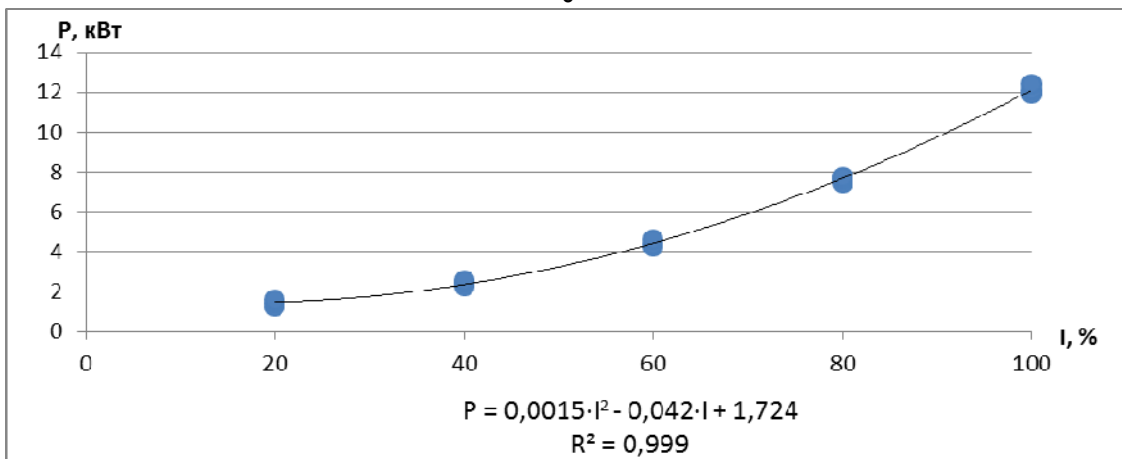
потребляемую ТВЧ установкой в зависимости от тока питающей сети в амперах I_A , и тока, выраженного на индикаторе ТВЧ установки в процентах $I\%$ (рис. 3).



а



б



в

Рис. 3. Зависимости для определения мощности P , кВт, потребляемой ТВЧ установкой:
а – экспериментальная зависимость $I_A = f(I\%)$ тока питающей сети в амперах I_A от тока, выраженного на индикаторе ТВЧ установки в процентах $I\%$;

б – зависимость $P = f(I_A)$ мощности P , кВт, потребляемой ТВЧ установкой от тока питающей сети I_A ; в – зависимость $P = f(I\%)$ мощности P , кВт, потребляемой ТВЧ установкой от тока, выраженного на индикаторе ТВЧ установки в процентах $I\%$

Выводы

Анализ результатов экспериментальных данных, представленных в таблице 1 и на рисунке 3, свидетельствует о следующем.

Зависимость тока питающей сети I_A , выраженного в амперах, от тока в индукторе I_0 , измеряемого в процентах, является нелинейной: при изменении I_0 от 20 до 100% ток в амперах I_A принимает значения от 2,5 до 20 А. Вследствие этого величина тока в процентах I_0 не позволяет дать объективную оценку тока в амперах I_A .

Из вышесказанного также следует, что ток в процентах I_0 не позволяет быстро и достоверно оценить величину мощности P , доставляемой ЭМП высокой частоты в нагреваемый объект. Зависимость $P=f(I_0)$ также является нелинейной. При этом мощность, потребляемая индукционной установкой из сети, изменяется в диапазоне от 2 до 12 кВт, т.е. различается в 6 раз. В связи с этим зависимость $P=f(I_0)$ не может являться выходной характеристикой датчика тока в индукторе, одним из основных требований которой является линейность [11].

С другой стороны, линейная зависимость $P=f(I_A)$ вполне удовлетворяет вышесформулированным требованиям линейности и может выступать в качестве выходной характеристики.

При этом немаловажным является то, что мощности, найденные по графикам на рисунке 3 с использованием тока I_A и I_0 , адекватны с погрешностью порядка 1%.

Библиографический список

1. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
2. Басов А.М., Быков В.Г., Лаптев А.В., Файн В.Б. Электротехнология. – М.: Агропромиздат, 1985. – 256 с.
3. ЭЛСИТ. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: URL: <https://ЭЛСИТ.РФ> (дата обращения: 13.11.2017).
4. Бобровский С.О., Багаев А.А. Информационно-измерительная система для измерения тока в индукторе высокочастотной индукционной установки // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. матер.: в 2 кн. / XIII Междунар. науч.-практ. конф. (15-16 февраля 2018 г.). – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2018. – Кн. 2. – С. 154-155.
5. Багаев А.А., Бобровский С.О. Основные положения методики косвенного измерения тока в индукторе ТВЧ установки // Вестник Алтайского

государственного аграрного университета. – 2018. – № 5 (163). – С. 171-178.

6. Багаев А.А., Бобровский С.О. Влияние поверхностного эффекта на величину тока в индукторе ТВЧ установки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 6 (164). – С. 186-192.

7. Багаев А.А., Бобровский С.О. Обоснование схемы зарядного устройства емкостного накопителя энергии колебательного RLC-контура для определения параметров индуктора ТВЧ установки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 8 (166). – С. 168-173.

8. Бобровский С.О., Багаев А.А. Проблема оценки тока и требования к датчику тока в индукторе высокочастотных установок // В сб.: Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник материалов: в 2 кн.: XIV Междунар. науч.-практ. конф. (7-8 февраля 2019 г.). – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2019. – Кн. 2. – С. 15-16.

9. Бессонов Л.Г. Теоретические основы электротехники. Учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1973. – 752 с., ил.

10. Мельников С.В., Алешкин В.Р., Роцин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. – 2 изд., перераб. и доп. – Л.: Колос; Ленингр. отд-ние, 1980. – 168 с.

11. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. – М.: Высшая школа, 1976. – 416 с.

References

1. Kuvaldin A.B. Induktsionnyy nagrev ferromagnitnoy stali. – M.: Energoatomizdat, 1988. – 200 s.
2. Basov A.M., Bykov V.G., Laptev A.V., Fayn V.B. Elektrotekhnologiya. – M.: Agropromizdat, 1985. – 256 s.
3. ELSIT. – Elektron. tekstovye dan. – Rezhim dostupa: URL: <https://ELSIT.RF> (data obrashcheniya: 13.11.2017).
4. Bobrovskiy S.O., Bagaev A.A. Informatsionno-izmeritelnaya sistema dlya izmereniya toka v induktore vysokochastotnoy induktsionnoy ustanovki // Agrarnaya nauka – selskomu khozyaystvu: sbornik materialov: v 2 kn. / XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (15-16 fevralya 2018 g.). – Barnaul: RIO Altayskogo GAU, 2018. – Kn. 2. – S. 154-155.

5. Bagaev A.A., Bobrovskiy S.O. Osnovnye polozheniya metodiki kosvennogo izmereniya toka v induktore TVCh ustanovki // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – No. 5 (163). – S. 171-178.

6. Bagaev A.A., Bobrovskiy S.O. Vliyaniye pov-erkhnostnogo effekta na velichinu toka v induktore TVCh ustanovki // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – No. 6 (164). – S. 186-192.

7. Bagaev A.A., Bobrovskiy S.O. Obosnovaniye skhemy zaryadnogo ustroystva emkostnogo nako-pitelya energii kolebatelnogo RLC-kontura dlya opre-deleniya parametrov induktora TVCh ustanovki // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – No. 8 (166). – S. 168-173.

8. Bobrovskiy S.O., Bagaev A.A. Problema otsenki toka i trebovaniya k datchiku toka v induktore

vysokochastotnykh ustanovok // Agrarnaya nauka – selskomu khozyaystvu: sbornik materialov: v 2 kn. / XIV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya kon-ferentsiya (7-8 fevralya 2019 g.). – Barnaul: RIO Altayskogo GAU, 2019. – Kn. 2. – S. 15-16.

9. Bessonov L.G. Teoreticheskie osnovy elekt-rotekhniki. Uchebnyk dlya studentov energeticheskikh i elektrotekhnicheskikh vuzov. – Izd. 6-e, pererab. i dop. – M.: Vyssh. shkola, 1973. – 752 s., il.

10. Melnikov S.V. Planirovaniye eksperimenta v issledovaniyakh selskokhozyaystvennykh protsessov / S.V. Melnikov, V.R. Aleshkin, P.M. Roshchin. – 2 izd., pererab. i dop. – L.: Kolos. Leningr. otd-nie, 1980. – 168 s.

11. Yuferov F.M. Elektricheskie mashiny avtoma-ticheskikh ustroystv. – M.: Vyssh. shkola, 1976. – 416 s.



УДК 631.3:636

Г.Е. Кокиева
G.Ye. Kokiyeva

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БЕЛКОВО-ВИТАМИННОГО КОНЦЕНТРАТА, ОБЛАДАЮЩЕГО ФАРМАКОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

EQUIPMENT FOR PRODUCTION OF PROTEIN-VITAMIN CONCENTRATE WITH PHARMACOLOGICAL PROPERTIES

Ключевые слова: производство белка, разработка оборудования, технология, получение биомассы, лекарственные вещества, заболевание животных, конструкция, массопередача, микробный синтез, технологическая стадия, оборудование, эксперимент, математическая модель, многофазные потоки, установка, интенсивность, перемешивание, скорость протекания процесса, барботер, газосодержание.

Описывается производство кормового белка с помощью микробиологического синтеза. Разработка технологии и оборудования для переработки отходов сельского хозяйства, продуктом чего является кормовой белок, обладающий фармакологической ценностью. Для выяснения механизма поступления питательных веществ, в том числе кислорода в клетку, обычно анализируется каждая стадия фазового перехода и переноса массы. Используется прием основной химической технологии. Микробный синтез осуществляется в ферментаторе новой конструкции. Полное азирование питательной культуральной жидкости по всему объему аппарата обеспечивает массообмен по всему полезному объему ферментатора. Искусственно созданный гидродинамический

режим в аппарате для культивирования микроорганизмов оказывает влияние на скорость протекания всех реакции, которые происходят в процессе культивирования микроорганизмов. Предлагаются математические модели кинетики развития микроорганизмов. Устойчивость и эффективность применяемых численных методов позволяют выполнить дальнейшую модификацию технологии расчета, включая подбор моделей турбулентности, с целью повышения точности расчетов.

Keywords: protein production, equipment development, technology, biomass production, medicinal substances, animal disease, design, mass transfer, microbial synthesis, technological stage, equipment, experiment, mathematical model, multiphase flows, installation, intensity, mixing, process flow rate, bubbler, gas content.

This paper describes the production of feed protein using microbiological synthesis. The development of technology and equipment for processing agricultural waste product into feed protein with pharmacological value. To determine the mechanism of nutrient intake, including oxygen into the cell, each stage of the phase transition and mass transfer is usu-