УДК 636.087.1:532.5

Профессор А.А. Шевцов, аспирант А.А. Коротаева,
студент С.А. Дятлова
(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра технологии хлебопекарных, макаронных, кондитерских и зерноперерабатывающих производств, тел. (473) 255-38-51
начальник ЦКП «Индустрия наносистем» А.А. Дерканосова
(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) ЦКП «Индустрия наносистем», тел. (473) 255-37-16

Кинетические закономерности и оптимизация процесса сушки жома красного клевера

Исследования кинетики процесса сушки проводились с жомом красного клевера на экспериментальной сушильной установке перегретым паром при атмосферном давлении в активных гидродинамических режимах. Были получены рациональные интервалы изменения параметров. Решена задача оптимизации, которая позволила выделить оптимальную область изменения входных факторов по трем критериям посредством компромиссных решений.

The kinetics of the drying process conducted with bagasse red clover on an experimental dryer superheated steam at atmospheric pressure in the active hydrodynamic regimes were studying. The rational intervals of parameter changes were obtained. The problem of optimization, which allowed allocating the optimum range of variation of the input factors according to three criteria through compromise was solved.

Ключевые слова: кинетикапроцесса сушки, оптимизация процесса сушки, травяной жом, красный клевер.

Разработка рецептур полнорационных комбикормов базируется на широком использовании добавок и премиксов лечебно-профилактического назначения и требует представления о потребностях различных видов и возрастных групп сельскохозяйственных животных, птицы и рыб в основных элементах питания[4]. Перспективным сырьем для производствапротеиновых концентратов, витаминов и других недорогих биологически активных веществ является листостебельная масса трав (биомасса) и, прежде всего, красный клевер, люцерна, топинамбур, амарант.

Данные научно-исследовательских учреждений и передовой опыт свидетельствуют о том, что, несмотря на заметный рост объема многолетних бобовых трав в структуре кормовых культур, большие потенциальные возможности их не реализуются применяемыми технологиями в кормопроизводстве [3]. Для реализации преимуществ бобовых культур требуется разработка принципиально новых технологий.

В Воронежском государственном университете инженерных технологий на кафедре технологии хлебопекарных, макаронных, кондитерских и зерноперерабатывающих производств ведётся научно исследовательская работа в направлении расширения сырьевой базы рецептурного состава комбикормов. Задачей исследований является разработка способа получения высококачественных готовых продуктов, а именно сухого жома и порошкообразного протеинового концентрата, снижение энергозатрат и повышение экологической безопасности при реализации данного способа.

Нами установлено, что применение в рационах животных сухого травяного жома благоприятно влияет на рост и развитие сельскохозяйственных животных, нормализует пищеварение, обеспечивает организм животных витаминами, аминокислотами, макро- микроэлементами [5]. Особенно важно его применение в зимний период. Наиболее эффективным способом подготовки жома красного клевера к хранению является сушка [2].

Травяной жом является капиллярно-пористым коллоидным телом и представляет собой сложную систему по своей структуре, содержащей высокое количество влаги ($W_н^c$ =200-400 % в пересчете на сухое вещество).

Исследования кинетики процесса сушки проводились с жомом красного клевера на экспериментальной сушильной установке перегретым паром при атмосферном давлении в активных гидродинамических режимах: при различных температурах перегретого пара $T_п$ = 393-423 К, при различных скоростях перегретого пара 1-3 м/с, при различных удельных нагрузках 2,5-15 кг/м^2.

© Шевцов А.А., Дерканосова А.А., Коротаева А.А., Дятлова С.А., 2013

Экспериментальные данные по кинетическим закономерностям представлены на рисунках 1-5.

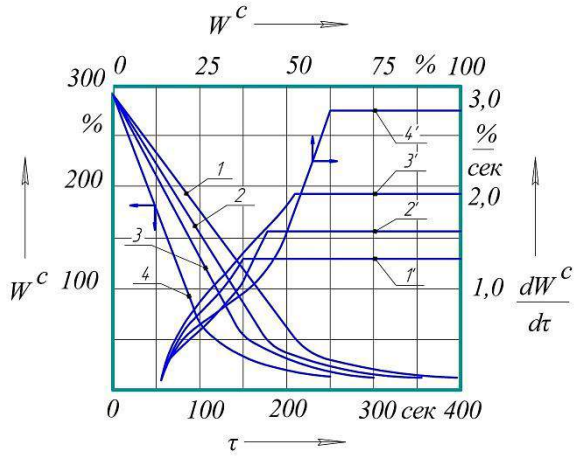

Рисунок 1 – Кривые сушки W^c= f(τ) (1-4) и скорости сушки dW^c/d(τ) =f (W^c)(1'-4') жома клевера при различных температурах перегретого пара, К:
1-393; 2-403; 3-413;4-423;q=5 мг/м^2; $\upsilon_п$=2 м/с

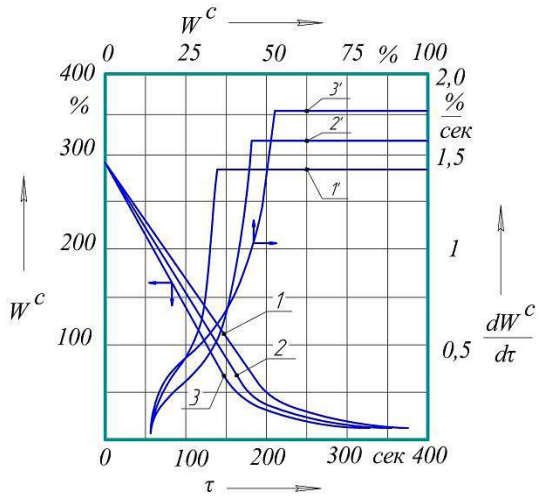

Рисунок 2 – Кривые сушки W^c= f(τ) (1-3) и скорости сушки dW^c / d(τ) =f (W^c) (1'-3') жома клевера при различных скоростях перегретого пара, м/с: 1-1; 2-2; 3-3; q=5 мг/м^2 ;$T_п$=403 К

Кривые сушки и кривые скорости свидетельствуют отом, что процесс сушки протекает в первом и втором периодах.

Увеличение температуры перегретого пара $T_п$ на входе в сушильную камеру с 393 К до 423 К приводит к возрастанию скорости сушки жома красного клеверав первом периоде на 50 %, а увеличение скорости перегретого пара в 3 раза (от 1 до 3 м/с) способствует возрастанию скорости сушки лишь на 20 % (рисунки 1, 2). Аналогично температура и скорость перегретого пара оказывают влияние на общую продолжительность процесса сушки, которая составляет 400 с.

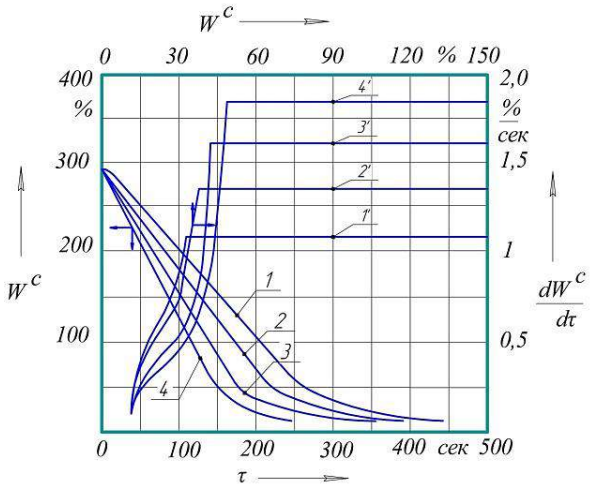

Рисунок 3 – Кривые сушки W^c= f(τ) (1-4) и скорости сушки dW^c / d(τ) =f (W^c) (1'-4') жома клевера при различных удельных нагрузках, кг/м^2 :
1-15; 2-10; 3-5; 4-2,5; $T_п$= 403К; $\upsilon_п$=2 м/с

Значительное влияние на скорость и продолжительность процесса сушки жома оказывает удельная нагрузка жома на газораспределительную решетку. Так уменьшение удельной нагрузки от 15 до 2,5 кг/м^2 способствует увеличению скорости сушки в первом периоде на 40 %, а общая продолжительность сушки при этом уменьшается на 43 %. Это объясняется увеличением коэффициента теплообмена вследствие активизации аэродинамического режима обтекания частиц жома теплоносителем и количеством подводимого к ним тепла.

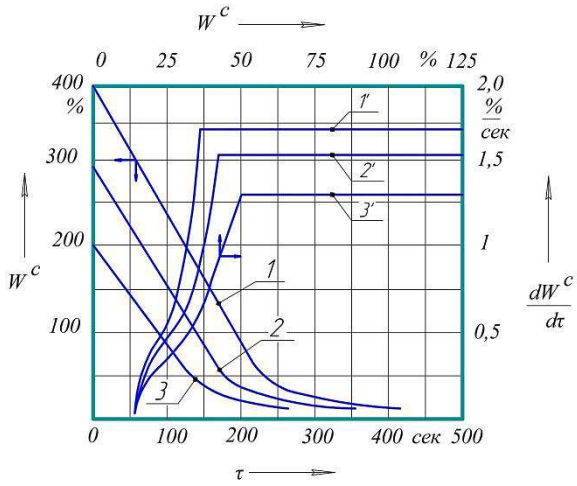

Рисунок 4 – Кривые сушки W^c = f(τ) (1-3) и скорости сушки dW^c / d(τ) =f (W^c) (1'-3') жома клевера при различной начальной влажности жома,%:
1-400; 2-293,7; 3-200; q=5 мг/м2 ; $T_п$=403 К, $\upsilon_п$=2 м/с

Начальная влажность жома красного клевера может изменяться в определенных пределах в зависимости от степени механического отжима. Из кривых сушки (рисунок 4) следует, что при постоянных режимных пара-

метрах процесса сушки снижение начальной влажности жома красного клевера от 400 до 200 % сокращает продолжительность сушки на 38 %. Снижение скорости сушки объясняется уменьшением коэффициента теплообмена и увеличением поверхности испарения в материале при одинаковых удельных нагрузках жома на газораспределительную решетку.

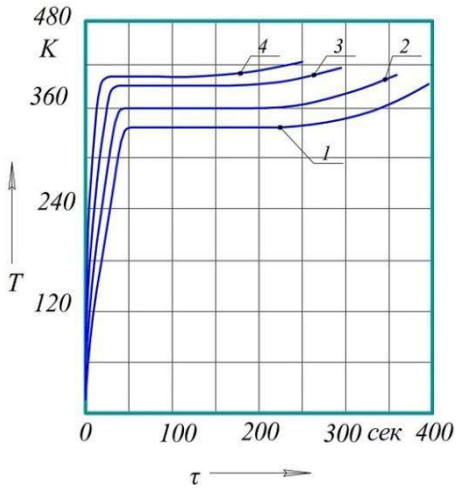

Рисунок 5 – Кривые нагрева $T_п = f(\tau)$ жома красного клевера при различных температурах перегретого пара, К:1-393; 2-403; 3-413; 4-423; q=5 мг/м^2;$\upsilon_п$=2 м/с

Характер изменения температуры частиц жома красного клевера, наблюдаемый на кривых нагрева (рисунок 5), соответствует периодам постоянной и убывающей скорости сушки. Материал прогревается до постоянной температуры очень быстро. Это обусловлено тем, что сушка осуществляется в активных гидродинамических режимах, малым характерным размером частиц объекта сушки, а также высокими коэффициентами теплообмена за счет использования в качестве сушильного агента перегретого пара.

Для исследования взаимодействия различных факторов, влияющих на процесс сушки жома красного клевера перегретым паром в кипящем слое, были применены математические методы планирования эксперимента [4]. Математическая модель изучаемого процесса представляется в виде полинома второй степени:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i X_i + \sum_{i=1}^{n} b_{ii} X_i^2 + \sum_{i \le j}^{n} b_{ij} X_i X_j , \quad (1)$$

где b_0– свободный член уравнения, равный средней величине отклика при условии, что рассматриваемые факторы находятся на средних, "нулевых" уровнях; X – масштабированные значения факторов, которые определяют функцию отклика и поддаются варьированию; b_{ij}– коэффициенты двухфакторных взаимодействий, показывающие, насколько изменяется степень влияния одного фактора при изменении величины другого; b_{ii}– коэффициенты квадратичных эффектов, определяющие нелинейность выходного параметра от рассматриваемых факторов; i, j – индексы факторов; n – число факторов в матрице планирования.

В качестве основных факторов, влияющих на процесс сушки жома красного клевера, были выбраны:

X_1 – температура перегретого пара на входе в камеру, К;

X_2 – скорость перегретого пара, м/с;

X_3 – удельная нагрузка на решетку, кг/м^2;

X_4 – начальная влажность материала, %.

Все эти факторы совместимы и не коррелируемы между собой. Пределы изменения исследуемых факторов приведены в таблице 1.

Выбор интервалов изменения факторов обусловлен технологическими условиями процесса сушки жома красного клевера в кипящем слое, возможностью уноса частиц материала из сушильной камеры, а также технико-экономическими показателями процесса. Критериями оценки влияния различных факторов на процесс сушки жома красного клевера были выбраны:

Y_1 – удельные энергозатраты процесса сушки, отнесенные на 1 кг испаренной влаги, кВт·ч/кг;

Y_2 – влагонапряжение сушильной камеры, кг/(м^3·с).

Таблица 1

Пределы изменения входных факторов

Условия планирования	Кодированное значение	Значения факторов в точках плана			
		X_1	X_2	X_3	X_4
		$T_п$, К	$\upsilon_п$, м/с	q,кг/м^2	$W_н^c$, %
Основной уровень	0	413	2	10	300
Интервал варьирования	Δ	10	0,5	2,5	50
Верхний уровень	+1	423	2,5	12,5	350
Нижний уровень	-1	403	1,5	7,5	250
Верхняя «звездная» точка	+2	433	3	15	400
Нижняя «звездная» точка	-2	393	1	5	200

Выбор критериев оценки Y обусловлен их наибольшей значимостью для процесса сушки жома красного клевера. Так Y_1 – удельные энергозатраты на процесс сушки определяют энергоемкость процесса, и являются важным показателем в оценке его энергетической эффективности; Y_2 – влагонапряжение сушильной камеры определяет производительность процесса сушки и напрямую связана с его скоростью. Для исследования было применено центральное композиционное униформ ротатабельное планирование и был выбран полный факторный эксперимент 2^4.

$$Y_1 = 1{,}352 + 0{,}063X_1 + 0{,}017X_2 + 0{,}132X_3 + 0{,}040X_4 + 0{,}03X_1X_2 - \\ - 0{,}059X_1X_3 - 0{,}043X_2X_3 - 0{,}038X_1^2 - 0{,}054X_2^2 - 0{,}042X_3^2 - 0{,}039X_4^2; \quad (2)$$

$$Y_2 = 0{,}1039 + 0{,}0107X_1 + 0{,}0077X_2 - 0{,}0011X_3 + 0{,}0096X_4 + 0{,}0049X_1X_4 + \\ + 0{,}0025X_2X_3 + 0{,}0039X_2X_4 - 0{,}0050X_1^2 - 0{,}0028X_4^2; \quad (3)$$

Анализ уравнений регрессии (2) и (3) позволяет выделить факторы, наиболее сильно влияющие на рассматриваемый процесс. На критерии оценки наибольшее влияние оказывает температура перегретого пара на входе в сушильную камеру, наименьшее – скорость перегретого пара. Причем знак плюс перед коэффициентом при линейных членах указывает на то, что при увеличении входного параметра значение выходного параметра увеличивается.

Степень влияния параметров относительно друг друга в уравнении (2): b_1:b_2 = 3,71; b_1:b_3 = 0,48; b_1:b_4 = 1,58; b_2:b_3 = 0,13; b_3:b_4 = 3,3; b_2:b_4 = 0,42.

Степень влияния параметров относительно друг друга в уравнении (3): b_1:b_2 =0,72; b_1:b_3 = 9,7; b_1:b_4 = 1,12; b_2:b_3 = 7; b_3:b_4 = 0,12; b_2:b_4 = 0,89.

Полученные уравнения (2) и (3) нелинейны.

В результате выполнения тридцати двух опытов получена информация о влиянии факторов и построена математическая модель процесса, позволяющая рассчитать удельные энергозатраты и влагонапряжение объема сушильной камеры внутри выбранных интервалов варьирования входных факторов.

Задача оптимизации сформулирована следующим образом: найти такие режимы работы сушилки, которые бы в широком диапазоне изменения входных параметров процесса сушки доставляли минимум удельных энергозатрат и максимум влагонапряжения сушильной камеры. Общая математическая постановка задачи оптимизации представлена в виде следующей модели:

$$q = q(Y_1, Y_2) \xrightarrow[x \in D]{} opt; \\ D: Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4) \xrightarrow[x \in D]{} min; \quad (4) \\ Y_2(X_1, X_2, X_3, X_4) \xrightarrow[x \in D]{} max;$$

$$Y_i \geq 0, i = \overline{1,2;}\ X_j \leq [-2;2],\ j = \overline{1,4}.$$

На рисунках 6-8 показаны кривые равных значений выходных параметров, которые несут смысл номограмм и представляют практический интерес.

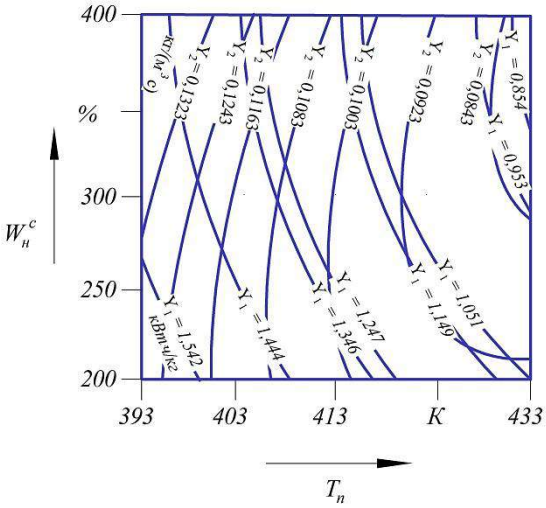

Рисунок 6 – Номограмма для определения удельных энергозатрат (Y_1) и влагонапряжения сушильной камеры (Y_2):q = 10 *кг/м²*; $\upsilon_п$ = 2 м/с

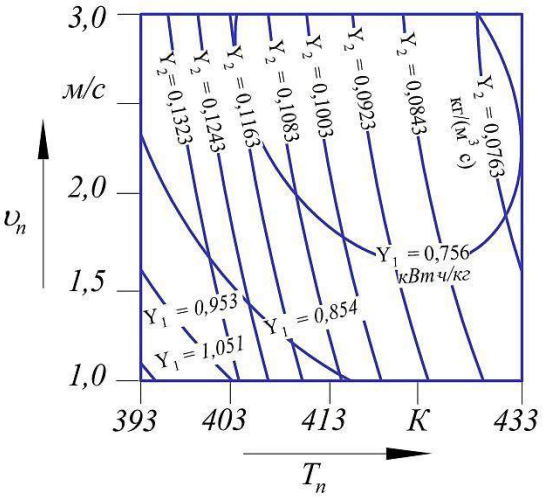

Рисунок 7 – Номограмма для определения удельных энергозатрат (Y_1) и влагонапряжения сушильной камеры (Y_2):q = 10 *кг/м²*; $W_н^c$ = *300* %

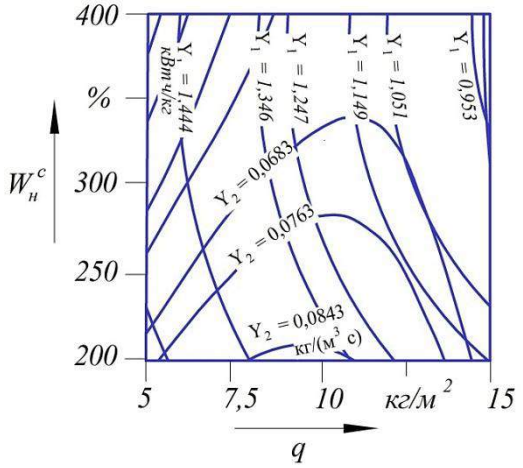

Рисунок 8 – Номограмма для определения удельныхэнергозатрат (Y_1) и влагонапряжения сушильной камеры (Y_2):T_n = 413 К; υ_n = 2 м/с

В таблице 2 сведены выбранные оптимальные интервалы изменения параметров X_i для всех исследуемых выходных факторов.

Для всех входных факторов X_i отличия по критериям оптимизации существенны, и для принятия окончательного решения были построены множества Парето.

Для получения одного конкретного решения из множества Парето пользуются сведением задачи векторной оптимизации к скалярной оптимизации путем выделения одного критерия (главного) и переводом остальных в разряд ограничений или построения глобального критерия в виде свертки целевых критериев.

В настоящей работе использовался весовой метод [1].

Таблица 2

Оптимальные интервалы параметров

Y_i	X_1, К		X_2, м/с		X_3, кг/м²		X_1, %	
	min	*max*	*min*	*max*	*min*	*max*	*min*	*max*
Y_1	392,8	401,7	1,750	1,915	3,6	5,8	267	285
Y_2	405	424,45	1,840	2,519	5,9	8,7	282	305

В результате применения указанного метода были получены рациональные интервалы изменения параметров [4]:

X_1 = 400…413 К; X_2 = 1,8…2 м/с;

X_3 = 5…7,5 кг/м²; X_4 = 280…300 %.

Для проверки правильности полученных результатов был поставлен ряд параллельных экспериментов, полученные результаты попадали в рассчитанные доверительные интервалы по всем критериям качества. При этом среднеквадратичная ошибка не превышала 3,8 %.

Таким образом, решена задача оптимизации, которая позволила выделить рациональную область изменения входных факторов по трем критериям посредством компромиссных решений.

Данная математическая модель может быть использована при разработке конструкции сушильной установки и способа управления технологическими параметрами процесса сушки травяного жома протеинсодержащих растений.

Полученные рациональные параметры положительно отразились на качестве готовой продукции (таблица 3). Установлена [2, 4] перспектива использования красного клевера как объекта кормопроизводства.

Наименование показателей, единицы измерения	Значение показателей (в пересчете на СВ)		НД на методы испытания
	Сухой травяной жом красного клевера	Травяная мука 1-го класса (ГОСТ 18691-88)	
М.д. сырого протеина, %, не менее	22,5	19	ГОСТ 13496.4
М.д. сырой клетчатки, %, не более	17,1	23	ГОСТ Р 52839
Содержание витамина B_1, мг/кг	0,44	-	Флоренская, Н.К. Технохимический контроль качества сырья и комбикормов [Текст]. – М: Колос, 1968. - 104 с.
Содержание витамина B_2, мг/кг	9,18	-	

Как видно из приведенных данных показатели качества сухого жома, высушен-

ного при температуре перегретого пара 403 К, выше, чем у травяной муки первого класса. Сухой травяной жом красного клевера имеет ряд преимуществ по сравнению с травяной мукой. Высокая сохранность ценных питательных веществ в сухом жоме, полученного в результате сушки перегретым паром, объясняется меньшей продолжительностью теплового воздействия и поддержанием при этом относительно невысокой температуры материала.

Анализируя проведенные нами исследования, следует отметить, что травяной жом красного клевера является ценным сырьем для производства комбикормов в сельском хозяйстве.

ЛИТЕРАТУРА

1 Грачев, Ю.П. Математические методы планирования экспериментов [Текст] / Ю.П. Грачев, Ю.М. Плаксин. – М.: ДеЛипринт, 2005. – 296 с.

2 Дранников, А.В. Техника и технология комплексной переработки протеинсодержащих зеленых растений [Текст] / А.В. Дранников, А.А. Дерканосова, А.А. Коротаева / Материалы LI отчётной научной конференции за 2012 г. – Воронеж: ВГУИТ, 2013. – Т.3. – С. 86.

3 Поединок, В.Е. Производство растительных белковых кормов [Текст] / В.Е. Поединок. – М.: Колос, 1994. - 204 с.

4 Шевцов, А.А. Анализ инновационной привлекательности использования вегетативной массы растений в комбикормах [Текст] / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, А.А. Дерканосова, А.А. Коротаева // Вестник ВГУИТ. – 2013. - №1. – С. 185-187.

5 Шевцов, А.А. Вегететивная масса растений, как нетрадиционный источник протеина [Текст] / А.А. Шевцов, А.В. Дранников, А.А. Дерканосова, А.А. Коротаева // Актуальная биотехнология. – 2013 - № 1. – С. 38-40.

REFERENCES

1 Grachev, U.P. Mathematical methods of planning of experiments [Text] / Y.P. Grachev, Y.M. Plaksin. – M.: DeLiprint, 2005. – 296 p.

2 Drannikov, A.V. Technique and technology of complex processing of protein containing green plants [Text] / A.V. Drannikov, A.A. Derkanosova, A.A. Korotaeva / Proceedings of LI of reporting scientific conference for 2012. – Voronezh: VSUET, 2013. – V.3 – P. 86.

3 Poedinok, V.E. Production of vegetable protein feeds [Text] / V.E. Poyedinok. – M.: Kolos, 1994. - 204 p.

4 Shevtsov, A.A. the analysis of innovative appeal of using vegetative mass of plants in compound feeds [Texts] / A.A. Shevtsov, A.V. Drannikov, A.A. Derkanosova, A.A. Korotaeva // Bulletin of VSUET. – 2013. - № 1. – P. 185-187.

5 Shevtsov, A.A. Vegetative mass of plants, as nonconventional source of a protein [Text] / A.A. Shevtsov, A.V. Drannikov, A.A. Derkanosova, A.A. Korotaeva // Actual biotechnology. – 2013. - № 1. – P. 38-40.