

Р. Т. Валеева, С. Г. Мухачев, И. В. Логинова

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА СУХИХ КОРМОВЫХ ДРОЖЖЕЙ

*Ключевые слова:* спиртовая барда, кормовые дрожжи, материальный баланс, математическое моделирование.

*Разработана методика расчета материального баланса процесса производства кормовых дрожжей с использованием спиртовой барды, не требующая измерения расхода барды. В качестве дополнительного соотношения при поиске значений потерь сухих веществ барды за счет метаболических процессов окисления субстратов, определяющих продуцирование углекислого газа, использовано уравнение баланса расчетной массы барды. Методика применена для анализа результатов промышленного эксперимента.*

*Key words:* alcohol stillage, fodder yeast, material balance, mathematical modeling.

*A method of material balance calculation of the process of fodder yeast production from alcohol stillage, which does not require measuring of stillage consumption, is developed. The equation of balance of estimated stillage mass was used as an additional relation for finding values of dry matter losses of stillage owing to metabolic oxidation of substrates with producing carbon dioxide. The method was used for analyzing results of industrial experiment.*

При проведении промышленных экспериментов часто возникает потребность выполнения полного балансового расчета. Например, когда фиксация технологического эффекта (прироста производительности) происходит в условиях нестабильности базового показателя (расхода или состава исходной питательной среды) и требуется пересчитать эффект относительно величины скорости потока, принятой за базовое значение.

Однако в условиях производства не обязательно имеются все необходимые средства измерения. Поэтому встает задача поиска дополнительных соотношений, которые могли бы быть использованы в балансовых расчетах таким образом, чтобы снизить число экспериментально фиксируемых параметров. Такая задача была решена при анализе производства кормовых дрожжей на основе спиртовой барды.

Общий объем отечественного производства кормовых белковых добавок, необходимых для получения полноценных кормов для сельскохозяйственных животных, позволяет в настоящее время покрыть не более 5 % существующих потребностей [1,2]. Для промышленного производства кормовых продуктов представляется перспективным получение сухих кормовых дрожжей (СКД) на базе спиртовых заводов с использованием послеспиртовой барды. Барда является объемным отходом производства, составляющая 85% отходов. По данным статистики [3, 4, 5] ежегодный объем барды в России составляет около 10 млн м<sup>3</sup>, среднесуточный объем барды получаемый только на одном спиртовом заводе, составляет 270-40 0м<sup>3</sup>. На каждый получаемый литр спирта образуется 13 л барды.

С развитием производства топливных спиртов проблема переработки барды усугубляется, поскольку производство сухой барды – крайне энергоемкий и потому экономически неэффективный процесс. Связано это с низким содержанием сухих веществ и, тем более, растворимых веществ в барде, которые могли бы являться субстратами для роста микроорганизмов. Однако, низкая фактическая стоимость барды, предотвращение экологического ущерба при ее переработке и снижение величины платы за загрязнение частично снимают экономические ограничения. И себестоимость получаемых кормовых дрожжей оказывается меньшей стоимости фуражного зерна.

Однако, переработка послеспиртовой барды в России, несмотря на известные разработки в этой области, сдерживается по ряду причин [6]. Широкому внедрению на спиртовых заводах технологии получения СКД на основе спиртовой барды является

недостаточная эффективность существующих методов производства, довольно высокая затратность и отсутствие оптимальных систем управления.

Одним из возможных путей решения проблемы повышения производительности цехов СКД спиртовых заводов является использование метода математического моделирования.

В таблице 1 приведена математическая модель роста биомассы в каскаде реакторов  $P_1$  и  $P_2$  с рабочими объемами  $10 \text{ м}^3$  и  $100 \text{ м}^3$  (рис.1).

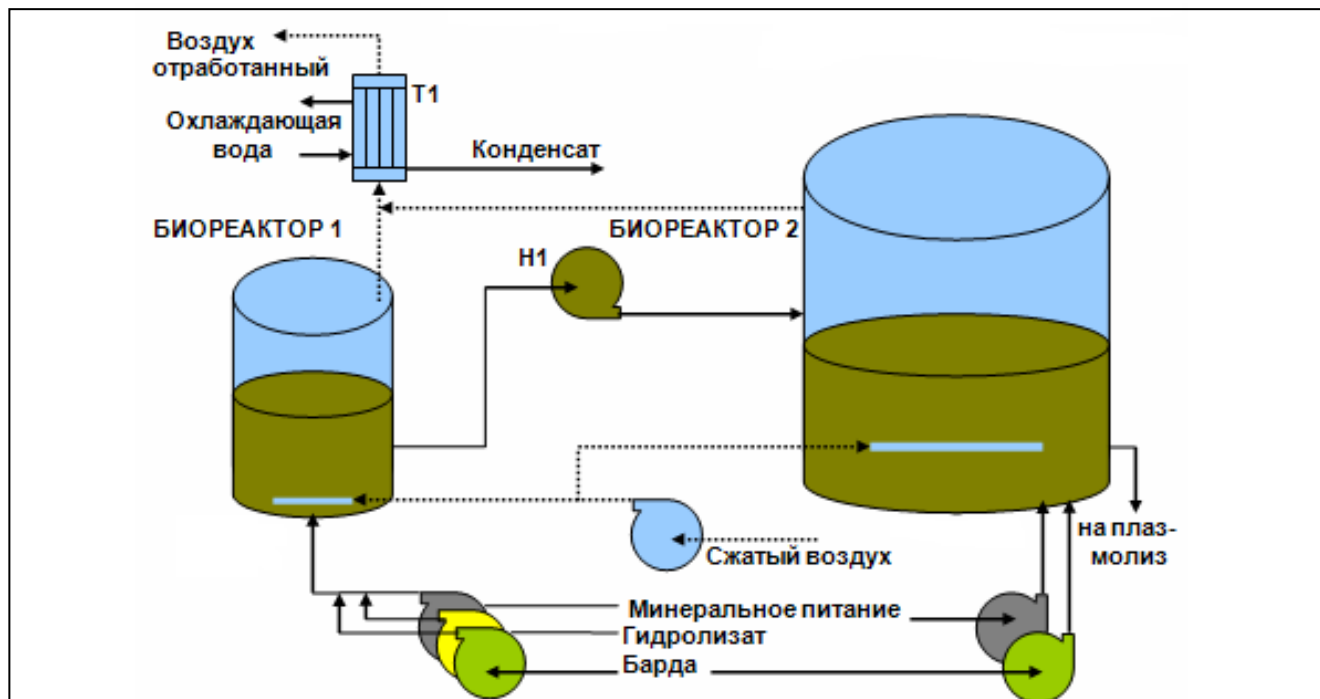


Рис. 1 - Технологическая схема производства СКД

Она представляет собой систему нелинейных уравнений материального баланса процесса аэробного культивирования микроорганизмов на сложных средах при неполной информации о материальных потоках.

Исходные параметры системы определялись для условий действующего производства СКД спиртового завода.

В качестве дополнительной питательной среды для обогащения спиртовой барды в промышленном эксперименте и в расчетах использовали сусло.

Соотношение общих расходов барды, сусла, и минеральных веществ ( $U_b, U_s, U_m$ ) выбиралось из соображений оптимального роста биомассы дрожжей и в процессе исследования не менялось.

Данная модель не учитывает минеральный состав питательной среды, который может существенно повлиять на рост биомассы, а также направленность и конечный эффект биосинтеза [6]. Естественно, в эксперименте предварительно были определены оптимальные соотношения содержания компонентов минерального питания и субстратов – источников углерода, которые не менялись в ходе эксперимента. Это позволило существенно сократить объем и сложность вычислительных процедур.

В выражениях удельных скоростей роста биомассы микроорганизмов в каскаде биореакторов представлено раздельное влияние двух субстратов: барды и сусла [8 - 10], поскольку кинетические параметры процессов ассимиляции органических кислот и сахаров, естественно, различны:

$$\mu_i = \mu_{iB} + \mu_{iS}, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

Указанные выше условия и подходы к построению модели процесса отражены в таблице 1, представляющей свод соотношений и уравнений математической модели процесса роста культуры дрожжей на обогащенной сахарами барде.

**Таблица 1 - Математическая модель роста кормовых дрожжей на обогащенной барде**

Обознач.	Параметры	Расчётная формула	Размерность	Значение
1	2	3	4	5
$U_B$	Общий расход барды		$м^3/час$	9,5
$U_{B1}$	Подача барды в $P_1$		$м^3/час$	0,667
$U_{B2}$	Подача барды в $P_2$	$U_{B2}=U_B-U_{B1}$	$м^3/час$	
$U_S$	Общий расход суслу		$м^3/час$	0,667
$U_{S1}$	Подача суслу в $P_1$		$м^3/час$	0,667
$U_{S2}$	Подача суслу в $P_2$	$U_{S2}=U_S-U_{S1}$	$м^3/час$	
$C_m$	Конц. раствора солей		$м^3/час$	200
$U_m$	Общий расход солей	$U_m=U_{m1}+U_{m2}$	$м^3/час$	
$U_{m1}$	Подача солей в $P_1$	$U_{m1}=(K_{m/B} * U_{B1} * B + K_{m/S} * U_{S1} * S) / C_m$	$м^3/час$	
$U_{m2}$	Подача солей в $P_2$	$U_{m2}=(K_{m/B} * U_{B2} * B + K_{m/S} * U_{S2} * S) / C_m$	$м^3/час$	
$U_{X0}$	Засев из БАЧК		$м^3/час$	0,6
$U_{X1}$	Отбор КЖ из $P_1$	$U_{X1}=U_R+U_{X0}+U_{B1}+U_{S1}+U_{m1}$	$м^3/час$	
$U_{X2}$	Отбор КЖ из $P_2$	$U_{X2}=U_{X1}+U_{B2}+U_{S2}+U_{m2}$	$м^3/час$	
$U_R$	Рециркуляция КЖ		$м^3/час$	0,417
$V_1$	Рабочий объем $P_1$		$м^3$	10
$V_2$	Рабочий объем $P_2$		$м^3$	100
$K_{m/B}$	Расход солей в рас-чете на растворимые соединения. барды		кгМ/кг РСВ	0,068
$K_{m/S}$	Расход солей в рас-чете на растворимые соединения. суслу		кгМ/кг РСС	0,051
$B_{c0}$				6,4
$S_{c0}$				19,6
$B_c$	Концентрация сухих веществ барды	$B_c=B_{c0} * d_B * 10$	кгСВ/м <sup>3</sup>	
$S_c$	Концентрация сухих веществ суслу	$B_s=S_{c0} * d_s * 10$	кгСВ/м <sup>3</sup>	
$d_B$	Плотность барды	$d_B=1+0,005 * B_{c[\%]}$	т/м <sup>3</sup>	
$d_S$	Плотность суслу	$d_S=1+0,005 * S_{c[\%]}$	т/м <sup>3</sup>	
$P_{во}$	Доля растворимых веществ барды			66,6
$P_{со}$	Доля растворимых веществ суслу			55
$B$	Концентрация растворимых соединений барды	$B=P_{во} * B_c / 100$	кгРСВ/м <sup>3</sup>	

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
S	Концентрация растворимых соединений сула	$S=P_{so} * S_c / 100$	кгPCB/м <sup>3</sup>	
PB <sub>v</sub>	Концентрация редуцирующих веществ барды		кгPB/м <sup>3</sup>	0,516
PB <sub>s</sub>	Концентрация редуцирующих веществ сула		кгPB/м <sup>3</sup>	109,8
X <sub>0</sub>	Концентрация АСД в БАЧК		кгАСД/м <sup>3</sup>	10
X <sub>1</sub>	Концентрация АСД в P <sub>1</sub>	$X_1=(U_R * X_2 + U_{X0} * X_0) / (U_{X1} - V_1 * Mu_1)$	кгАСД/м <sup>3</sup>	
X <sub>2</sub>	Концентрация АСД в P <sub>2</sub>	$X_2=U_{X1} * X_1 / (U_{X2} - V_2 * Mu_2)$	кгАСД/м <sup>3</sup>	
K <sub>B</sub>	Константа лимитирования роста компонентами барды		кгPCB/м <sup>3</sup>	40
K <sub>S</sub>	Константа лимитирования роста компонентами сула		кгPCB/м <sup>3</sup>	30
Y <sub>B</sub>	Выход биомассы с 1 кг барды		кгАСД/кгB	0,38
Y <sub>S</sub>	Выход биомассы с 1 кг сула		кгАСД/кгS	0,5
B <sub>1</sub>	Концентрация растворимых веществ барды в P <sub>1</sub>	$B_1=(U_R * B_2 + U_{B1} * B - V_1 * Mu_{1B} * X_1 / Y_B) / U_{X1}$	кгPCB/м <sup>3</sup>	
B <sub>2</sub>	Концентрация растворимых веществ барды в P <sub>2</sub>	$B_2=(U_{X1} * B_1 + U_{B2} * B - V_2 * Mu_{2B} * X_2 / Y_B) / U_{X2}$	кгPCB/м <sup>3</sup>	
S <sub>1</sub>	Концентрация растворимых веществ сула в P <sub>1</sub>	$S_1=(U_R * S_2 + U_{S1} * S - V_1 * Mu_{1S} * X_1 / Y_S) / U_{X1}$	кгPCB/м <sup>3</sup>	
S <sub>1</sub>	Концентрация растворимых веществ сула в P <sub>1</sub>	$S_1=(U_R * S_2 + U_{S1} * S - V_1 * Mu_{1S} * X_1 / Y_S) / U_{X1}$	кгPCB/м <sup>3</sup>	
S <sub>2</sub>	Концентрация растворимых веществ сула в P <sub>2</sub>	$S_2=(U_{X1} * S_1 + U_{S2} * S - V_2 * Mu_{2S} * X_2 / Y_S) / U_{X2}$	кгPCB/м <sup>3</sup>	
L <sub>B1</sub>	Лимитирующая функция B в P <sub>1</sub>	$L_{B1}=B_1 / (K_B + B_1)$	-	
L <sub>S1</sub>	Лимитирующая функция S в P <sub>1</sub>	$L_{S1}=S_1 / (K_S + S_1)$	-	
L <sub>B2</sub>	Лимитирующая функция B в P <sub>2</sub>	$L_{B2}=B_2 / (K_B + B_2)$	-	

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
$L_{S2}$	Лимитирующая функция S в P <sub>2</sub>	$L_{S2}=S_2/(K_S+S_2)$	-	
$\mu_{max}$	Максимальная удельная скорость роста		1/час	0,86
$\mu_1$	Удельная скорость роста в P <sub>1</sub>	$\mu_1=\mu_{max}*(L_{S1}*L_{S1}+L_{B1}*L_{B1})/(L_{S1}+L_{B1})$	1/час	
$\mu_2$	Удельная скорость роста в P <sub>2</sub>	$\mu_2=\mu_{max}*(L_{S2}*L_{S2}+L_{B2}*L_{B2})/(L_{S2}+L_{B2})$	1/час	
$\mu_{1B}$	Доля "B" в величине скорости роста в P <sub>1</sub>	$\mu_{1B}=\mu_{max}*L_{B1}*L_{B1}/(L_{S1}+L_{B1})$	1/час	
$\mu_{1S}$	Доля "S" в величине скорости роста в P <sub>1</sub>	$\mu_{1S}=\mu_{max}*L_{S1}*L_{S1}/(L_{S1}+L_{B1})$	1/час	
$\mu_{2B}$	Доля "B" в величине скорости роста в P <sub>2</sub>	$\mu_{2B}=\mu_{max}*L_{B2}*L_{B2}/(L_{S2}+L_{B2})$	1/час	
$\mu_{2S}$	Доля "S" в величине скорости роста в P <sub>2</sub>	$\mu_{2S}=\mu_{max}*L_{S2}*L_{S2}/(L_{S2}+L_{B2})$	1/час	

Из определяемых аппаратурных и кинетических технологических ограничений на скорости потока в каждом реакторе:

$$U_{x1} \leq 0,25 \cdot V_1$$

$$U_{x2} \leq 0,15 \cdot V_2$$

следует, что существует некоторое минимальное возможное время пребывания культуральной жидкости в системе. В нашем случае:  $\tau_{min} = 10,67$  [час].

При меньшем времени пребывания не достигается требуемое содержание белка в биомассе, поскольку синтез белковых структур задерживается относительно синтеза полисахаридов клеточных стенок и нуклеиновых кислот.

На рис.2 приведена расчетная зависимость производительности системы от времени пребывания. Как видно из графика, эта зависимость носит экстремальный характер, при этом максимум производительности находится за пределами допустимой области времени пребывания, т.е.  $\tau^* \leq \tau_{min}$ .

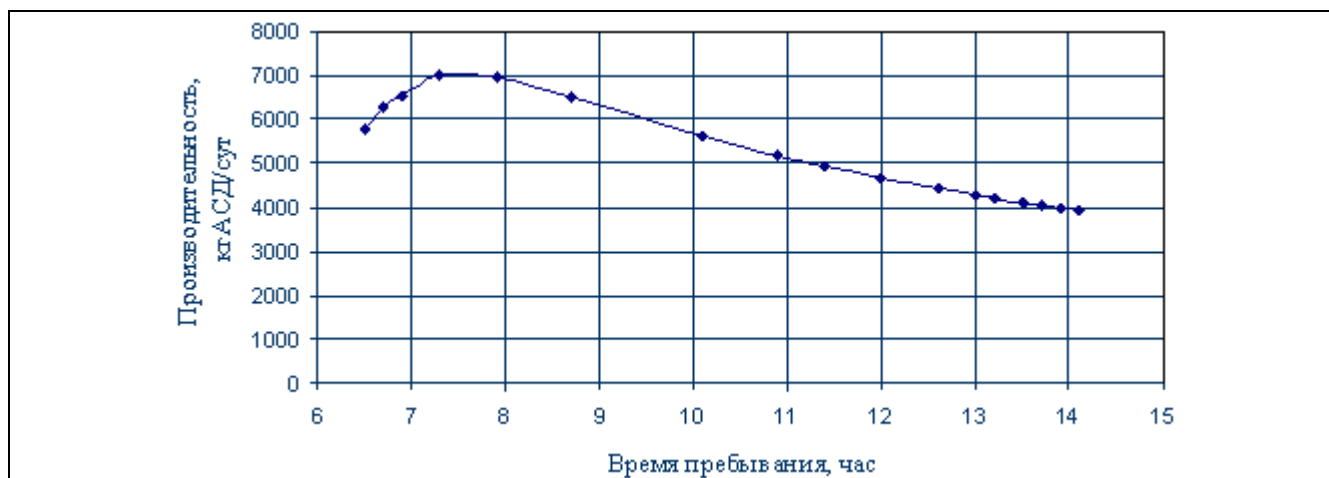


Рис. 2 - Зависимость производительности каскада реакторов от времени пребывания

Следовательно, в рассматриваемой технологической системе максимум производительности самопроизвольно не достигается, и необходимо решить задачу оптимального управления этой системой.

В качестве управляемых параметров системы выбраны две технологические переменные: отношение потока барды к потоку посевных дрожжей ( $k_1$ ) и доля потока барды, поступающей в первый реактор ( $k_2$ ). Таким образом, общий расход барды будет  $U_B = k_1 \cdot U_{X0}$ ; подача барды в первый аппарат будет  $U_{B1} = k_2 \cdot U_B$ ; общий расход суслу будет  $U_S = k_2 \cdot U_S$ .

Критерием оптимальности является производительность батареи реакторов:

$$P = U_{X2} \cdot (k_1, k_2) \cdot X_2 \cdot (k_1, k_2) \cdot 24, \text{ [кгАСД/сут]} \quad (2)$$

$$P(k_1, k_2) \rightarrow \max$$

Реальный процесс функционирования системы протекает при наличии следующих ограничений:

$$\begin{aligned} U_{X1} &\leq 0,25 \cdot V_1 \\ U_{X2} &\leq 0,15 \cdot V_2 \\ x_2 &\geq 16,33 \\ k_1 &\geq 0 \\ 0 &\leq k_2 \leq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Получаемый продукт на выходе из каскада (батареи аппаратов) должен иметь достаточно высокую концентрацию, чтобы уменьшить нагрузку на сушильный аппарат и предотвратить залипание дрожжей, поскольку при влажности свыше 75 % органика прилипает к паровым трубам, что создает технологические проблемы и усложняет процесс обезвоживания [10].

В нашем случае оптимизация проводилась при ограничении  $x_2 \geq 16,33$  [кг АСД/м<sup>3</sup>], чтобы исключить поиск оптимума производительности при низких значениях концентрации биомассы.

Расчёты выполнялись в среде MathCad, что позволило совместить стандартные процедуры поиска решения системы нелинейных уравнений с поиском оптимальных значений целевой функции. Процедура расчета предусматривала проверку полученных результатов. Значения управляемых и расчетных (зависимых) параметров приведены в таблицах 2 - 4.

**Таблица 2 - Значения оптимизируемых параметров и целевой функции**

Параметр	Без оптимизации	Оптимальное значение
$k_1$	15,83	18,72
$k_2$	0,07	0,08
Производительность, кгАСД/сут	4280	5075,2

Таким образом, без модернизации производства, варьируя два технологических параметра, можно увеличить производительность по биомассе на 18,6 %.

**Таблица 3 – Оптимальные значения технологических параметров**

№ реактора	Концентрация $x_i^*$ , кгАСД/м <sup>3</sup>	Расход барды $U_{B_i}^*$ , м <sup>3</sup> /ч	Скорость протока $U_{X_i}^*$ , м <sup>3</sup> /ч	Время пребывания $\tau_i$ , час
1	21,20	0,93	2,50	4
2	16,33	10,31	12,96	7,72
На выходе		11,24		11,72

Ниже приведены результаты расчетов по биомассе и субстратам.

**Таблица 4 - Производительность по биомассе**

Производительность [кгАСД/сут]	5075,2	
Сухие вещества барды [кг АСВ/сутки]	17817,11	
Сухие вещества сусла [кг АСВ/сутки]	4798,28	
Содержание белка [кг/сутки]	Дрожжи	2031,09
	Барда	3967,87
	Сусло	165,06
Общее количество полученного белка [кг/сутки]	6164,02	
Расход солей [кг АМВ/сутки]	941,49	
Общий поток сухих веществ на выходе системы [кг АСВ/сутки]	14474,12	
Выброс CO <sub>2</sub> [кг CO <sub>2</sub> /сутки]	1269,43	
Влажность готового продукта	7,15%	
Содержание белка в продукте %	39,54	
Остаток непотребленных растворимых веществ барды [кг АСВ/сутки]	1974,56	
Остаток непотребленных растворимых веществ сусла [кг АСВ/сутки]	260,13	
Выход непотребленных солей [кг АМВ/сутки]	320,99	

### Выводы

1. Расчеты с использованием математической модели показывают возможность увеличения производительности по биомассе на 18,6 % без модернизации производства.

2. Дальнейшее повышение эффективности производства кормовых дрожжей возможно лишь в рамках оптимального проектирования системы.

### Литература

1. Мухачев, С.Г. Повышение производительности цеха кормовых дрожжей, перерабатывающего послеспиртовую барду / С.Г. Мухачев, В.М. Емельянов, И.С. Владимирова, Н.К. Филиппова, Р.Т. Валева // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2004. - № 1-2. - С. 147- 155.
2. Валева, Р.Т. Применение смешанной культуры дрожжей в процессе переработки спиртовой барды / Р.Т. Валева, С.Г. Мухачёв, В.М. Емельянов, И.С. Владимирова, Н.К. Филиппова // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2005. - № 2. – С. 6-7.
3. Кайшев, А.Ш. Послеспиртовая зерновая барда – перспективный источник биологически активных веществ / А.Ш. Кайшев, Н.Ш. Кайшева, В.А. Челомбитько, Ю.К. Василенко // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2011. - № 2. – С. 30-33.
4. Винаров, А.Ю. Промышленная биотехнология переработки отходов спиртовых заводов /А.Ю. Винаров, Ю.В. Ковальский, А.И. Зайкина // Экология окружающей среды стран СНГ. -2004. - №2. – С.84-86.
5. Усов, Е.Н. Комплексная переработка послеспиртовой барды/ Е.Н.Усов // Резонанс. – 2006. - №8. – С.8-11.
6. Поляков, В.А. Инновационное развитие технологии переработки послеспиртовой барды / В. А. Поляков // Производство спирта и ликероводочных изделий. - 2009.-№ 3. С. 6-9.
7. Градова, Н. Б. Особенности микроорганизмов, используемых в технологических процессах получения белка и биологически активных веществ / Н. Б. Градова, О. А. Решетник. – Казань: КХТИ, 1987. - 80 с.
8. Мухачев, С.Г. Расчет материального баланса цеха кормовых дрожжей / С.Г. Мухачев, Р.Т. Валева // Производство спирта и ликероводочных изделий.- 2007. - №1. – С. 8-9
9. Лапытов, Р.А. Повышение эффективности процесса переработки барды за счет гидролиза ее нерастворимых компонентов / Р.А. Лапытов, С.Г. Мухачев, В.Н. Мельников // V Кирпичниковские

чения. Тезисы докладов. XIII Международная конференция молодых ученых, студентов и аспирантов.- Казань, Изд-во Казан. Гос. Технол. Ун-та, 2009, с.348.

10. *Мухачев, С.Г.* Обогащение спиртовой барды в процессе выращивания кормовых дрожжей / С.Г. Мухачев, В.Н. Мельников // Тезисы доклада на научно-практической конференции «Современные ресурсо- и энергосберегающие технологии в спиртовой и ликеро-водочной промышленности». – Казань, 2000. – С .47-48.

11. *Леденев, В. П.* Комплексная переработка крахмалистого сырья на спирт с получением белково-углеводных кормопродуктов в концентрированном и сухом виде / В. П. Леденев, В. А. Кравченко, Н.Я. и др.// М.: АгроНИИТЭИПП. 1992. - Вып. 5. - 40 с.

---

© **Р. Т. Валеева** - канд. техн. наук, доц., программист каф. химической кибернетики КНИТУ; valrt2008@rambler.ru; **С. Г. Мухачев** - канд. техн. наук, доц., зав. лаб. инженерных проблем биотехнологии каф. химической кибернетики КНИТУ; **И. В. Логинова** - канд. техн. наук, доцент той же кафедры.