

Рождение вина: балансы



В. С. Разуваев,
кандидат технических наук,
ЧП «Маркетинговая фирма РВС»,
г. Ялта
Тел.: +38 0654 39 63 80,
+38 096 484 72 54
E-mail: vrasouvaev@rambler.ru

Переработка винограда сопровождается множеством микробиологических процессов, представляющих собой сложные биохимические реакции разложения органических соединений в результате роста и жизнедеятельности как искусственно вносимых в благоприятную для развития среду культур микроорганизмов, так и спонтанной микрофлоры.

К настоящему времени в практике нашли применение и проводятся направленно процессы спиртового, яблочно-молочного, яблочно-спиртового брожения, биологического азотопонижения, вторичного спиртового брожения, хересования, мадеризации, обескислороживания, сравнительно реже — процессы благородного гниения, в стадии разработки получение биомассы дрожжей, бактерий и грибов на отходах переработки винограда. Одновременно ведется борьба с нежелательными процессами, нередко вызываемыми теми же микроорганизмами.

Технологические расчеты проводятся на основе стехиометрических коэффициентов баланса: основной субстрат — основной продукт. Участвующую в процессе биомассу не учи-

тывают даже там, где ее прирост играет решающее значение (биологическое азотопонижение). Отсутствие необходимых сведений по кинетике микробиологических процессов и анализу этих процессов с позиций роста и метаболизма их возбудителей существенно сдерживает совершенствование технологий переработки винограда. Опыт смежных отраслей в данном вопросе малоприменим, поскольку отдельные процессы в виноделии в виду своей сложности не имеют аналогов. Ярким доказательством тому может служить сбраживание сусла на мезге, в котором одновременно протекают тепловые, экстракционные, микробиологические, гидродинамические и биотехнологические процессы.

Многообразие микробиологических и сопутствующих им процессов ведет к необходимости создания единого алгоритма для расчетов процессов переработки винограда.

Универсальная математическая модель микробиологических процессов переработки винограда.

Среди технологических процессов переработки винограда наиболее

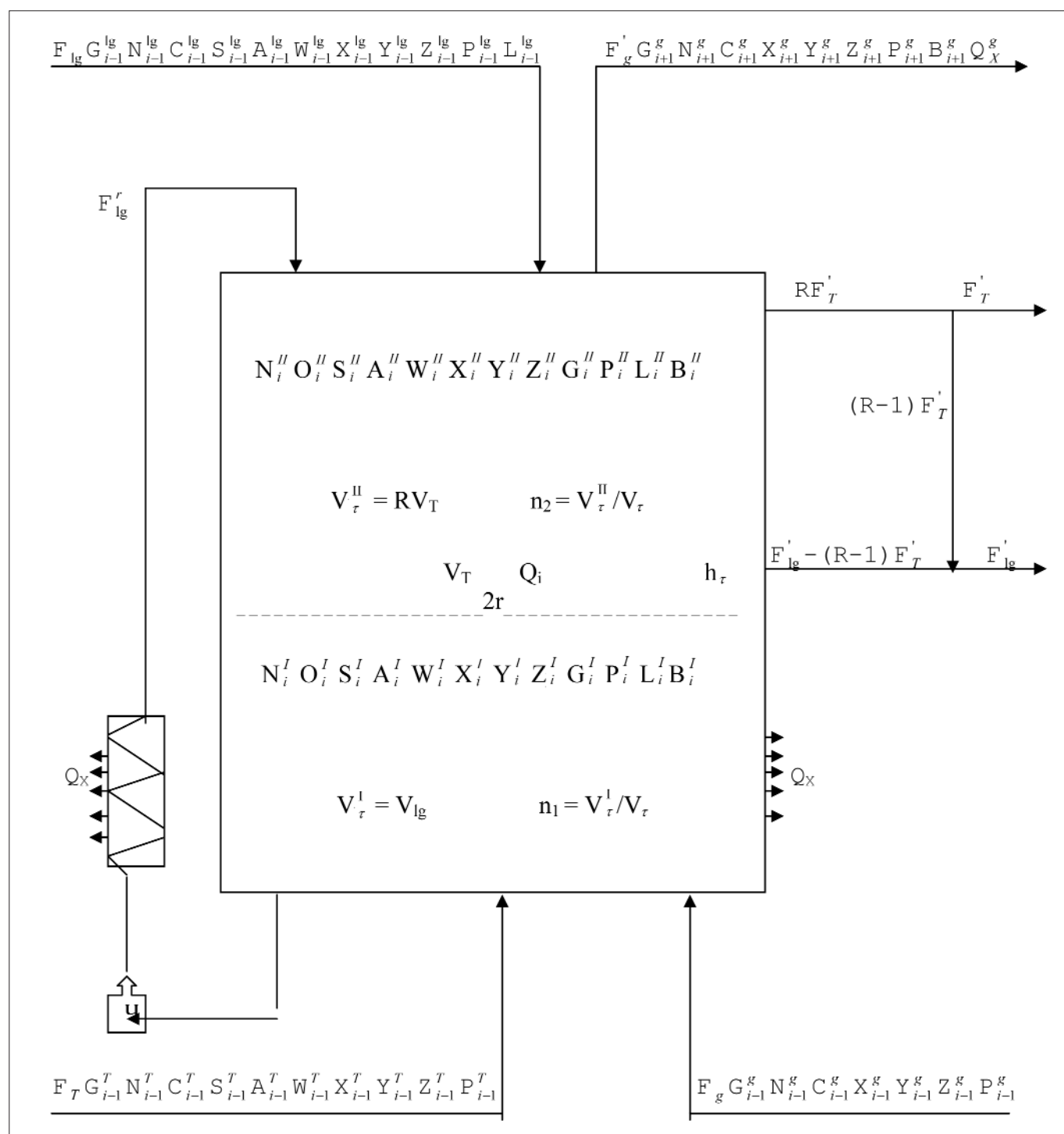
сложным является брожение. Сложность этого процесса заключается не только в биохимическом механизме его протекания, но и в сопутствующих ему массообменных процессах, связанных с наличием поверхности раздела твердой (выжимки, взвеси) и жидкой (сусло) фаз.

Несмотря на существенные различия, протекающих при брожении сусла на мезге процессов, видах участвующих микроорганизмов (винные дрожжи, молочнокислые бактерии, дрожжи-кислотопонижатели), утилизируемом углеродном субстрате, а также методах осуществления процессов представляется возможным дать в общем виде математическую модель, отражающую основные материальные балансы участвующих компонентов, кинетику роста и жизнедеятельности микроорганизмов-возбудителей.

Для построения математической модели рассмотрим наиболее сложный случай — брожение сусла на мезге с участием винных дрожжей, дрожжей-кислотопонижателей рода шизосахаромицес и молочнокислых бактерий (рис.1).



Рис. 1. Схема материально-энергетических потоков i -го аппарата-ферментера



Условные обозначения к схеме основных потоков i -го аппарата-ферментера и универсальной математической модели микробиологических процессов переработки винограда:

- $F_{lg}, F_T, F_g, F_{lg}'$ – объемные скорости подачи в аппарат жидкой, твердой и газовой фаз, а также рециркуляции, жидкой ферментационной среды соответственно, $\text{дм}^3/\text{ч}$;
- F_{lg}', F_T', F_g' – объемные скорости отвода из аппарата жидкой, твердой и газовой фаз соответственно, $\text{дм}^3/\text{ч}$;
- $RF_T', (R-1)F_T'$ – объемные скорости отвода из аппарата бродящей массы с твердой фазой;
- $F_{lg}' - (R-1)F_T'$ – бродящей массы, освобожденной от твердой фазы; и ферментационной среды из зоны, свободной от твердой фазы соответственно, $\text{дм}^3/\text{ч}$;

$V_{\tau} = V_{\tau}^I + V_{\tau}^{II}$	– текущий объем бродящей массы в аппарате, дм³;
V_{τ}^I	– объем зоны бродящей массы, свободной от твердой фазы, дм³;
V_{τ}^{II}	– объем зоны бродящей массы, в котором распределена твердая фаза (кажущийся объем твердой фазы), дм³;
V_T	– истинный объем твердой фазы в аппарате, дм³;
$R = V_{\tau}^{II} / V_T$	– объемный коэффициент распределения твердой фазы в занимаемой ею зоне ферментационной среды;
$(R-1)V_T$	– объем, занимаемый газожидкостной фазой в зоне ферментационной среды с твердой фазой;
$(R-1)/R$	– доля объема газожидкостной фазы в объеме ферментационной среды с твердой фазой;
$n_1 = V_{\tau}^I / V_{\tau}$	– доля объема ферментационной среды, свободной от твердой фазы;
$n_2 = V_{\tau}^{II} / V_{\tau}$	– доля объема ферментационной среды, в которой распределена твердая фаза ($n_2 = 1 - n_1$);
$n_2(R-1)/R$	– доля объема газожидкостной фазы зоны ферментационной среды с твердой фазой в общем объеме ферментационной среды;
$D_{lg} = F_{lg} / V_{\tau}$	– скорости разбавления бродящей массы жидкой, твердой и газовой фазами, а также рециркулируемой жидкой средой, ч⁻¹;
$D_T = F_T / V_{\tau}$	
$D_g = F_g / V_{\tau}$	
$D_{lg}^r = F_{lg}^r / V_{\tau}$	
$D_{lg}' = F_{lg}' / V_{\tau}$	– удельные скорости отвода из аппарата жидкой, твердой и газовой фаз, ч⁻¹;
$D_T' = F_T' / V_{\tau}$	
$D_g' = F_g' / V_{\tau}$	
Q_i	– текущее количество теплоты в аппарате, кДж;
$N_{i-1}^{lg}, N_{i-1}^T, N_{i+1}^g$	– массовые концентрации азота (N), кислорода (C), диоксида углерода (G) и этанола (P) в подаваемых (i-1) в аппарат и отводимых (i+1) из него жидкой, твердой и газовой фазах соответственно, г/дм³;
$C_{i-1}^{lg}, C_{i-1}^T, C_{i+1}^g$	
$G_{i-1}^{lg}, G_{i-1}^T, G_{i+1}^g$	
$P_{i-1}^{lg}, P_{i-1}^T, P_{i+1}^g$	
S_{i-1}^{lg}, S_{i-1}^T	– массовые концентрации сахаров (глюкозы) (S), яблочной кислоты (A), фенольных веществ (W) и молочной кислоты (L) в подаваемых в аппарат жидкой и твердой фазах соответственно, г/дм³;
A_{i-1}^{lg}, A_{i-1}^T	
W_{i-1}^{lg}, W_{i-1}^T	
L_{i-1}^{lg}, L_{i-1}^T	
$X_{i-1}^{lg}, X_{i-1}^T, X_{i+1}^g$	– массовые концентрации винных дрожжей (X), дрожжей-кислотопонижателей (Y) и молочнокислых бактерий (Z) в подаваемых (i-1) в аппарат и отводимых (i+1) из него жидкой, твердой и газовой фазах соответственно, г/дм³;
$Y_{i-1}^{lg}, Y_{i-1}^T, Y_{i+1}^g$	
$Z_{i-1}^{lg}, Z_{i-1}^T, Z_{i+1}^g$	
$N_i^I, N_i^{II}, C_i^I, C_i^{II}$	– массовые концентрации азота (N), кислорода (C), диоксида углерода (G), этанола (P), сахаров (S), фенольных веществ (W), молочной кислоты (L) и яблочной кислоты (A) в зоне ферментационной среды, свободной от твердой фазы (I) и в жидкой фазе объема среды, в котором распределена твердая фаза (II), то есть в объеме $(R-1)V_T$, г/дм³;
$G_i^I, G_i^{II}, P_i^I, P_i^{II}$	
$S_i^I, S_i^{II}, W_i^I, W_i^{II}$	
$L_i^I, L_i^{II}, A_i^I, A_i^{II}$	
$X_i^I, X_i^{II}, Y_i^I, Y_i^{II}$	– массовые концентрации микроорганизмов в зоне ферментационной среды, свободной от твердой фазы (I) и в зоне с твердой фазой (II), г/дм³;
Z_i^I, Z_i^{II}	
$K_T^N, K_T^C, K_T^S, K_T^P$	– коэффициенты, отражающие массоперенос азота, кислорода, сахаров, этанола, яблочной кислоты, диоксида углерода, фенольных веществ и молочной кислоты;
$K_T^A, K_T^G, K_T^W, K_T^L$	

$a_X, a_Y, a_Z, b_X, b_Y, b_Z, m_X, m_Y, m_Z$	– коэффициенты расхода азота (a), сахаров (b) и кислорода (m) на образование единицы биомассы винных дрожжей (X), дрожжей-кислотопонижателей (Y) и молочнокислых бактерий (Z), г соответствующего вещества/г соответствующей биомассы;
$\mu_X^I, \mu_X^{II}, \mu_Y^I, \mu_Y^{II}$	– удельные скорости роста винных дрожжей (X), дрожжей-кислотопонижателей (Y) и молочнокислых бактерий (Z) в зоне ферментационной среды, свободной от твердой фазы (I) и в зоне с твердой фазой (II), ч⁻¹;
μ_Z^I, μ_Z^{II}	
$q_{Xi}^I, q_{Xi}^{II}, q_{Yi}^{IS}$	– удельные скорости сбраживания сахаров винными дрожжами и дрожжами-кислотопонижателями в зоне ферментационной среды, свободной от твердой фазы (I) и в зоне с твердой фазой (II), г сахаров/г соответствующих дрожжей (25% С.В.)⁻¹ч⁻¹;
q_{Yi}^{IIS}	
$q_{Yi}^{IA}, q_{Yi}^{IIA}, q_{Zi}^I$	– удельные скорости сбраживания яблочной кислоты дрожжами-кислотопонижателями (Y) и молочнокислыми бактериями (Z) в зоне ферментационной среды, свободной от твердой фазы (I) и в зоне с твердой фазой (II), г яблочной кислоты/г соответствующих микроорганизмов⁻¹ч⁻¹;
Φ_X, Φ_Y, Φ_Z	– коэффициенты выноса винных дрожжей, дрожжей-кислотопонижателей и молочнокислых бактерий из зоны, свободной от твердой фазы (I);
Ψ_X, Ψ_Y, Ψ_Z	– доля винных дрожжей (X), дрожжей-кислотопонижателей (Y) и молочнокислых бактерий (Z) адсорбированных твердой фазой в общем количестве каждой из этих групп микроорганизмов в объеме среды, занимаемом твердой фазой (V_T^{II});
$K_X^{Sg}, K_Y^{Sg}, K_Z^{Sg}$	– коэффициенты выхода диоксида углерода при потреблении сахаров на образование единицы биомассы винных дрожжей, дрожжей-кислотопонижателей и молочнокислых бактерий соответственно, г диоксида углерода/г соответствующей биомассы 25%С.В.;
K_{eX}^{Sg}, K_{eY}^{Sg}	– коэффициенты выхода диоксида углерода из единицы массы сброженных сахаров винными дрожжами и дрожжами-кислотопонижателями соответственно, г диоксида углерода/г сахаров (глюкозы);
K_{eY}^{Ag}, K_{eZ}^{Ag}	– коэффициенты выхода диоксида углерода из единицы массы сброженной яблочной кислоты дрожжами-кислотопонижателями и молочнокислыми бактериями соответственно, г диоксида углерода/г яблочной кислоты;
K_{eX}^{Sp}, K_{eY}^{Sp}	– коэффициенты выхода этанола из единицы массы сброженных сахаров винными дрожжами и дрожжами-кислотопонижателями соответственно, г этанола/г сахаров (глюкозы);
K_{eY}^{Ap}	– коэффициент выхода этанола из единицы массы сброженной яблочной кислоты дрожжами-кислотопонижателями, г этанола/г яблочной кислоты;
K^{Pg}	– коэффициент перехода этанола из жидкой фазы в газовую, г этанола в парах/г этанола в жидкости;
K^{Bg}	– коэффициент перехода воды в газовую фазу, г воды в парах/г воды в ферментационной среде;
K_V^S	– коэффициент уменьшения (сжатия) объема жидкой фазы при «исчезновении» из ферментационной среды единицы массы сахаров (глюкозы);
K_{cZ}^{Al}	– коэффициент выхода молочной кислоты из единицы массы яблочной кислоты при яблочно-молочном брожении, г молочной кислоты/г яблочной кислоты;
d_P, d_b, d_A	– плотность этанола, воды и яблочной кислоты соответственно, г/см³;
d_{lg}, d_T, d_g	– объемная масса (плотность) жидкой твердой и газовой фаз соответственно, г/см³;
d_g^C	– объемная масса (плотность) «осушенного» газа брожения, г/см³;
$C_{i-1}^{lg}, C_{i+1}^{lg}$	– удельные теплоемкости подаваемых (–) [или отводимых (+)] в (из) аппарат(а) жидкой, твердой и газовой фаз соответственно, кДж/кг⁰С;
T_{i-1}^T, T_{i+1}^T	
C_{i-1}^g, C_{i+1}^g	
$t_{i-1}^{lg}, t_{i+1}^{lg}$	– температура подаваемых (–) [или отводимых (+)] в (из) аппарат(а) жидкой твердой и газовой фаз соответственно, °С;
t_{i-1}^T, t_{i+1}^T	
t_{i-1}^g, t_{i+1}^g	
t_i, t_{i+1}	– температура ферментационной среды и жидкой фазы, возвращаемой в аппарат при рециркуляции, °С;



C_X, C_Y, C_Z	- выход теплоты при образовании единицы биомассы винных дрожжей, дрожжей-кислотопонижателей и молочнокислых бактерий соответственно, кДж/г биомассы 25% С.В.;	f_X, f_Y, f_Z	- коэффициенты адсорбции фенольных веществ единицей биомассы винных дрожжей, дрожжей-кислотопонижателей и молочнокислых бактерий соответственно, г фенольных веществ/г соответствующей биомассы;
C_{SX}, C_{SY}	- выход теплоты при сбраживании единицы массы сахаров (глюкозы) винными дрожжами и дрожжами-кислотопонижателями соответственно, кДж/г сахаров (глюкозы);	$N_i, C_i, S_i, A_i, W_i, X_i, Y_i, Z_i, G_i, P_i, L_i$	- массовые концентрации азота (N), кислорода (C), сахаров (S), яблочной кислоты (A), фенольных веществ (W), винных дрожжей (X), дрожжей-кислотопонижателей (Y), молочнокислых бактерий (Z), диоксида углерода (G) и молочной кислоты в жидкой фазе ферментационной среды, г/дм ³ ;
λ_P, λ_B	- удельная теплота испарения этанола и воды, кДж/г;		
K_t	- коэффициент теплопередачи, Вт/м ² ·°C;		
Δt_c	- средний температурный напор, °C;		

$$N_i = n_1 N_i' + n_2 \frac{R-1}{R} N_i'', C_i = n_1 C_i' + n_2 \frac{R-1}{R} C_i'', S_i = n_1 S_i' + n_2 \frac{R-1}{R} S_i'',$$

$$A_i = n_1 A_i' + n_2 \frac{R-1}{R} A_i'', W_i = n_1 W_i' + n_2 \frac{R-1}{R} W_i'', X_i = n_1 X_i' + n_2 \frac{R-1}{R} X_i'',$$

$$Y_i = n_1 Y_i' + n_2 \frac{R-1}{R} Y_i'', Z_i = n_1 Z_i' + n_2 \frac{R-1}{R} Z_i'', G_i = n_1 G_i' + n_2 \frac{R-1}{R} G_i'',$$

$$P_i = n_1 P_i' + n_2 \frac{R-1}{R} P_i'', L_i = n_1 L_i' + n_2 \frac{R-1}{R} L_i'';$$

r - внутренний радиус аппарата, м;

h - высота внутренней части аппарата, м;

K_3 - коэффициент заполнения аппарата;

P_i^g, B_i - массовые концентрации этанола и воды в газовой фазе соответственно, г/дм³;

K - коэффициент отражающий изменение объема среды (контракцию) при повышении в ней концентрации этанола;

τ - время, ч.

Универсальная математическая модель микробиологических процессов переработки винограда может быть представлена в виде системы дифференциальных уравнений основных материальных балансов описываемых процессов. В целях придания модели обобщающего характера рассмотрим материальные балансы процессов в i -м аппарате-ферментере.

Баланс по азоту

Азот может поступать в аппарат в составе жидкой и твердой фаз, а также и с газовой фазой, например, в виде аммиака (NH₃). Основной движущей силой, способствующей задержке азота в бродящей среде является разность его концентраций в твердой и жидкой, газовой и жидкой фазах. Движение потоков фаз приводит к перемешиванию

среды в ферментере в зоне, занимаемой твердой фазой и зоне, свободной от твердой фазы. В связи с этим, определение количества азота, поглощенного (в большинстве случаев его концентрация в поступающих в аппарат потоках выше, чем в жидкой фазе бродящей массы) жидкой фазой существенно зависит от средневзвешенной концентрации азота в жидкой среде аппарата:

$$\frac{N_i' V_{\tau}' + N_i'' (V_{\tau}'' - V_T)}{V_{\tau}' + V_{\tau}'' - V_T} \quad (1)$$

После подстановки соответствующих коэффициентов и преобразований получаем:

$$\frac{1}{R-n_2} [R n_1 N_i' + (R-1) n_2 N_i''] \quad (2)$$

С учетом (1) количество азота, поступившего в жидкую фазу определится как:

$$[F_{lg} N_{i-1}^{lg} - F_{lg}' N_i' - F_T' (R-1) (N_i'' - N_i')] d\tau + F_T \{ N_{i-1}^T - \frac{1}{R-n_2} [n_1 R N_i' + n_2 (R-1) N_i''] \} K_T^N d\tau + (F_g N_{i-1}^g - F_g' N_{i+1}^g) d\tau \quad (3)$$

В бродящей массе часть азота используется микроорганизмами для построения биомассы, что может быть описано следующим образом:

$$n_1 (a_X X_i' \mu_{X_i}' + a_Y Y_i' \mu_{Y_i}' + a_Z Z_i' \mu_{Z_i}') V_{\tau} d\tau + n_2 (a_X X_i'' \mu_{X_i}'' + a_Y Y_i'' \mu_{Y_i}'' + a_Z Z_i'' \mu_{Z_i}'') V_{\tau} d\tau$$

Обозначим мгновенное изменение количества азота в бродящей жидкой фазе как $V_{\tau} dN_i$ и составим уравнение материального баланса:

$$V_{\tau} dN_i = [F_{lg} N_{i-1}^{lg} - F_{lg}' N_i' - F_T' (R-1) (N_i'' - N_i')] d\tau + F_T \{ N_{i-1}^T - \frac{1}{R-n_2} [n_1 R N_i' + n_2 (R-1) N_i''] \} K_T^N d\tau + (F_g N_{i-1}^g - F_g' N_{i+1}^g) d\tau - n_1 (a_X X_i' \mu_{X_i}' + a_Y Y_i' \mu_{Y_i}' + a_Z Z_i' \mu_{Z_i}') V_{\tau} d\tau + n_2 (a_X X_i'' \mu_{X_i}'' + a_Y Y_i'' \mu_{Y_i}'' + a_Z Z_i'' \mu_{Z_i}'') V_{\tau} d\tau \quad (4)$$

Аналогично, с учетом накопленных знаний о характере того или иного процесса составляем материальные балансы по кислороду (С), сахарам (S), яблочной кислоте (А), фенольным веществам (W), диоксиду углерода (G), этанолу (P), винным дрожжам (X), дрожжам-кислотопонижателям (Y), молочнокислым бактериям (Z), молочной кислоте (L), а также тепловой и объемный (по изменению объема среды) балансы.

Разделив обе части уравнений на $V_i dt$ получаем искомую математическую модель микробиологических процессов, имеющих место при рождении вина:

$$\begin{aligned} dN_i/d\tau = D_{lg} N_{i-1}^{lg} + D_T K_T^N \{ N_{i-1}^T - \frac{1}{R-n_2} [n_1 R N_i^I + n_2 (R-1) N_i^{II}] \} + D_g N_{i-1}^g - \\ D_{lg}' N_i^I - D_T' (R-1) (N_i^{II} - N_i^I) - D_g' N_{i+1}^g - n_1 (a_X X_i^I \mu_{Xi}^I + a_Y Y_i^I \mu_{Yi}^I + a_Z Z_i^I \mu_{Zi}^I) - \\ - n_2 (a_X X_i^{II} \mu_{Xi}^{II} + a_Y Y_i^{II} \mu_{Yi}^{II} + a_Z Z_i^{II} \mu_{Zi}^{II}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} dC_i/d\tau = D_{lg} C_{i-1}^{lg} + D_T K_T^C \{ C_{i-1}^T - \frac{1}{R-n_2} [n_1 R C_i^I + n_2 (R-1) C_i^{II}] \} + D_g C_{i-1}^g - \\ D_{lg}' C_i^I - D_T' (R-1) (C_i^{II} - C_i^I) - D_g' C_{i+1}^g - n_1 (m_X X_i^I \mu_{Xi}^I + m_Y Y_i^I \mu_{Yi}^I + m_Z Z_i^I \mu_{Zi}^I) - \\ - n_2 (m_X X_i^{II} \mu_{Xi}^{II} + m_Y Y_i^{II} \mu_{Yi}^{II} + m_Z Z_i^{II} \mu_{Zi}^{II}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} dS_i/d\tau = D_{lg} S_{i-1}^{lg} + D_T K_T^S \{ S_{i-1}^T - \frac{1}{R-n_2} [n_1 R S_i^I + n_2 (R-1) S_i^{II}] \} - D_{lg}' S_i^I - \\ D_T' (R-1) (S_i^{II} - S_i^I) - n_1 (b_X X_i^I \mu_{Xi}^I + b_Y Y_i^I \mu_{Yi}^I + b_Z Z_i^I \mu_{Zi}^I + X_i^I q_{Xi}^{IS} + Y_i^I q_{Yi}^{IS}) - \\ - n_2 (b_X X_i^{II} \mu_{Xi}^{II} + b_Y Y_i^{II} \mu_{Yi}^{II} + b_Z Z_i^{II} \mu_{Zi}^{II} + X_i^{II} q_{Xi}^{IIS} + Y_i^{II} q_{Yi}^{IIS}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} dA_i/d\tau = D_{lg} A_{i-1}^{lg} + D_T K_T^A \{ A_{i-1}^T - \frac{1}{R-n_2} [n_1 R A_i^I + n_2 (R-1) A_i^{II}] \} - D_{lg}' A_i^I - \\ D_T' (R-1) (A_i^{II} - A_i^I) - n_1 (Y_i^I q_{Yi}^{IA} + Z_i^I q_{Zi}^{IA}) - n_2 (Y_i^{II} q_{Yi}^{IIA} + Z_i^{II} q_{Zi}^{IIA}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} dW_i/d\tau = D_{lg} W_{i-1}^{lg} + D_T K_T^W \{ W_{i-1}^T - \frac{1}{R-n_2} [n_1 R W_i^I + n_2 (R-1) W_i^{II}] \} - D_{lg}' W_i^I - \\ D_T' (R-1) (W_i^{II} - W_i^I) - n_1 (f_X X_i^I \mu_{Xi}^I + f_Y Y_i^I \mu_{Yi}^I + f_Z Z_i^I \mu_{Zi}^I) - \\ - n_2 (f_X X_i^{II} \mu_{Xi}^{II} + f_Y Y_i^{II} \mu_{Yi}^{II} + f_Z Z_i^{II} \mu_{Zi}^{II}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} dG_i/d\tau = D_{lg} G_{i-1}^{lg} + D_T K_T^G \{ G_{i-1}^T - \frac{1}{R-n_2} [n_1 R G_i^I + n_2 (R-1) G_i^{II}] \} + D_g G_{i-1}^g - \\ D_{lg}' G_i^I - D_T' (R-1) (G_i^{II} - G_i^I) - D_g' G_{i+1}^g + 2n_1 (K_X^{Sg} X_i^I \mu_{Xi}^I + K_Y^{Sg} Y_i^I \mu_{Yi}^I + K_Z^{Sg} Z_i^I \mu_{Zi}^I + \\ + K_{eX}^{Sg} X_i^I q_{Xi}^{IS} + K_{eY}^{Sg} Y_i^I q_{Yi}^{IS} + K_{eY}^{Ag} Y_i^I q_{Yi}^{IA} + K_{eZ}^{Ag} Z_i^I q_{Zi}^{IA}) + 2n_2 \frac{R-1}{R} (K_X^{Sg} X_i^{II} \mu_{Xi}^{II} + K_Y^{Sg} Y_i^{II} \mu_{Yi}^{II} + \\ + K_Z^{Sg} Z_i^{II} \mu_{Zi}^{II} + K_{eX}^{Sg} X_i^{II} q_{Xi}^{IIS} + K_{eY}^{Sg} Y_i^{II} q_{Yi}^{IIS} + K_{eY}^{Ag} Y_i^{II} q_{Yi}^{IIA} + K_{eZ}^{Ag} Z_i^{II} q_{Zi}^{IIA}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} dP_i/d\tau = D_{lg} P_{i-1}^{lg} + D_T K_T^P \{ P_{i-1}^T - \frac{1}{R-n_2} [n_1 R P_i^I + n_2 (R-1) P_i^{II}] \} + D_g P_{i-1}^g - \\ D_{lg}' P_i^I - D_T' (R-1) (P_i^{II} - P_i^I) - D_g' (n_1 + n_2 \frac{R-1}{R}) P_i^P K^{Pg} d^C + n_1 (K_{eX}^{Sp} X_i^I q_{Xi}^{IS} + \\ + K_{eY}^{Sp} Y_i^I q_{Yi}^{IS} + K_{eY}^{Ap} Y_i^I q_{Yi}^{IA}) + n_2 (K_{eX}^{Sp} X_i^{II} q_{Xi}^{IIS} + K_{eY}^{Sp} Y_i^{II} q_{Yi}^{IIS} + K_{eY}^{Ap} Y_i^{II} q_{Yi}^{IIA}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} dX_i/d\tau = D_{lg} X_{i-1}^{lg} + D_T X_{i-1}^T + D_g X_{i-1}^g - [D_{lg}' - D_T' (R-1)] \Phi_X X_i^I - \\ - D_T' [R+1 + \psi_X (2-R)] X_i^{II} - D_g' X_{i+1}^g + n_1 X_i^I \mu_{Xi}^I + n_2 X_i^{II} \mu_{Xi}^{II} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} dY_i/d\tau = D_{lg} Y_{i-1}^{lg} + D_T Y_{i-1}^T + D_g Y_{i-1}^g - [D_{lg}' - D_T' (R-1)] \Phi_Y Y_i^I - \\ - D_T' [R+1 + \psi_Y (2-R)] Y_i^{II} - D_g' Y_{i+1}^g + n_1 Y_i^I \mu_{Yi}^I + n_2 Y_i^{II} \mu_{Yi}^{II} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} dZ_i/d\tau = D_{lg} Z_{i-1}^{lg} + D_T Z_{i-1}^T + D_g Z_{i-1}^g - [D_{lg}' - D_T' (R-1)] \Phi_Z Z_i^I - \\ - D_T' [R+1 + \psi_Z (2-R)] Z_i^{II} - D_g' Z_{i+1}^g + n_1 Z_i^I \mu_{Zi}^I + n_2 Z_i^{II} \mu_{Zi}^{II} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} dQ_i/V_i d\tau = D_{lg} d_{lg} c_{i-1}^{lg} (t_{i-1}^{lg} - t_i) + D_g d_g c_{i-1}^g (t_{i-1}^g - t_i) + n_1 c_Z Z_i^I \mu_{Zi}^I + n_2 c_Z Z_i^{II} \mu_{Zi}^{II} + \\ + c_{SX} (n_1 X_i^I q_{Xi}^{IS} + n_2 X_i^{II} q_{Xi}^{IIS}) + c_{SY} (n_1 Y_i^I q_{Yi}^{IS} + n_2 Y_i^{II} q_{Yi}^{IIS}) - (n_1 + n_2 \frac{R-1}{R}) (c_i^g t_i + \lambda_P P_i^P K^{Pg} + \\ + \lambda_B B_i K^{Bg}) D_g' d_g^C - 10^{-3} K_f K_i \Delta \tau_c - D_{lg}^r d_{lg} c_i (t_i - t_{i+1}) \end{aligned} \quad (15)$$



$$dV_r/V_r d\tau = D_{lg} + D_T - D'_{lg} - D'_T - K_V^S [n_1(X_i^I q_{Xi}^I + Y_i^I q_{Yi}^{IS}) + n_2(X_i^{II} q_{Xi}^{II} + Y_i^{II} q_{Yi}^{IIS})] + \\ + (1-K)[n_1(K_{eX}^{Sp} X_i^I q_{Xi}^I + K_{eY}^{Sp} Y_i^I q_{Yi}^{IS}) + n_2(K_{eX}^{Sp} X_i^{II} q_{Xi}^{II} + K_{eY}^{Sp} Y_i^{II} q_{Yi}^{IIS})] 10^{-3} dP - \\ - (n_1 + n_2) \frac{R-1}{R} (P_i K^{Pg}/d_P + B_i K^{Bg}/d_B) 10^{-3} D_g^C d_g^C \quad (16)$$

Для последнего уравнения:

При $D_{lg}=0$ и $n_2=0$ $P_i = P_i^I$

Модель описывает все основные способы осуществления бродильных процессов: непрерывное брожение, брожение с возвратом (задержкой) биомассы, доливное и периодическое, а также ряд экстракционных и теплообменных процессов, протекающих и без участия микроорганизмов.

При необходимости ее можно дополнить уравнениями, отражающими баланс по другим компонентам — фосфору, сере... В случае одновременного (или последовательного) прохождения в среде большего количества микробиологических процессов, например, продуцирования полигалактуроназы дрожжами вида *Zigofabospora marsiana*, уксуснокислых бактерий, культивирования высших грибов, модель может дополняться уравнениями, отражающими

изменения концентрации субстратов и возбудителей процессов.

Полное исследование достаточно сложной системы осуществить пока невозможно, к тому же относительно невелика вероятность одновременно-го прохождения более 3-х микробиологических процессов как спонтанно, так и направленно.

Универсальность модели позволяет рекомендовать ее для решения множества частных случаев процессов брожения-культивирования микроорганизмов, например, рассчитывать стационарные режимы процессов (левые части уравнений равны нулю). Это должно дать ощутимый практический результат, в первую очередь, при анализе трудно поддающихся логической оценке процессов, связанных с потоками нескольких

фаз. Эффективность использования модели, очевидно, будет возрастать по мере накопления знаний о поведении коэффициентов уравнений в зависимости от условий протекания процессов и состава культуральных сред.

Коэффициенты модели

Большинство из коэффициентов модели определяется довольно легко на основании известных стехиометрических соотношений (для определения коэффициентов, связанных с образованием биомассы, нами были рассмотрены и проанализированы основные стехиометрические соотношения процессов роста и метаболизма дрожжей и бактерий на виноградном сусле (5)), нормативных документов, справочной литературы и экспериментальных данных о том или ином процессе (табл. 1).

Таблица 1

Значения коэффициентов модели применительно к микробиологическим процессам переработки винограда

№ п/п	Коэффициент	Единица измерения	Значение	Информация о процессе	Примечание
1	2	3	4	5	6
1	R	-	5	Брожение мезги	
2	n_1	-	5,3 1 0	Брожение сусла на наполнителе из ржаной соломы Брожение осветленного сусла, культивирование микроорганизмов на жидких питательных средах Брожение на погруженных в сусло (на дно резервуара) наполнителях при уровне бродящего сусла меньшем или равном уровню верхнего слоя наполнителей	
3	n_2	-	0,5 1 — n_1	Брожение мезги Брожение (культивирование микроорганизмов) с перемешиванием без задержки биомассы в ферментере	
4-6	Φ_x, Φ_y, Φ_z	-	1 0	Брожение (культивирование микроорганизмов) с полной задержкой биомассы в ферментере Брожение (культивирование микроорганизмов) с частичным выносом биомассы из ферментера	Устанавливается экспериментально
7-9	Ψ_x, Ψ_y, Ψ_z	-	между 0 и 1 0	Брожение осветленного сусла, культивирование микроорганизмов на жидких питательных средах	
10	f_x	г фенольных веществ/г винных дрожжей	между 0 и 1 не менее 0,0015	Брожение (культивирование микроорганизмов) в присутствии твердой фазы Брожение (культивирование микроорганизмов)	Устанавливается экспериментально Расчетная величина (по разнице концентраций фенольных веществ в сусле и винноматериале, деленной на 10 г)
11	f_y	г фенольных веществ/г дрожжей-кислотоподавателей	--- " --- " ---	--- " --- " --- " ---	

№ п/п	Коэф-фициент	Единица измерения	Значение	Информация о процессе	Примечание
1	2	3	4	5	6
12	f_z	г фенольных веществ/г бактерий		---	
13	K_{ν}^S	дм ³ /г глюкозы	0,000623	Брожение (культивирование микроорганизмов)	
14	d_p	г/см ³	0,789	---	
15	d_b	г/см ³	1,000	---	
16	d_{lg}	г/см ³		---	Определяется экспериментально
17	d_g^C	г/дм ³	1,90	Сухой газ брожения (культивирования)	Принята близкой к d_{CO_2}
18	d_{CO_2}	г/дм ³	1,97	Диоксид углерода	
19	C_{i-1}^{lg}	кДж/кг*°C	4,18	Виноградное сусло	
20	C_{i-1}^T	кДж/кг*°C	0,33	Выжимка (твердая часть мезги)	Расчетная величина
21	C_{i+1}^g	кДж/кг*°C	0,00102	Сухой газ брожения (культивирования)	Принята близкой к теплоемкости CO ₂
22	a_X, a_Y, a_Z	г азота/г биомассы	0,023	Рост микроорганизмов на виноградном сусле (глюкозе)	Расчетная величина
23	b_X, b_Y, b_Z	г глюкозы/г биомассы	0,473	---	---
24	c_X, c_Y, c_Z	кДж/г биомассы	4,36	---	---
25	m_X, m_Y, m_Z	г кислорода/г биомассы	0,28	Брожение виноградного сусла (мезги)	---
26	K_{eY}^{Ag}	г CO ₂ /г яблочной кислоты	0,657	---	---
27	K_{eZ}^{Ag}	---	0,328	---	---
28	K_{eY}^{Ap}	г этанола/г яблочной кислоты	0,343	---	---
29	K_{eZ}^{Al}	г молочной кислоты/г яблочной кислоты	0,672	---	---
30	K_T^W	-	0,36	Брожение мезги (Ркацителли, Рислинг) при температуре 24-26°C и спиртуозности 6-7 % об.	Определено экспериментально
31	K	-	0,08	Все спиртосодержащие среды	Справочные данные
32	K_t	кДж/м ² ч°C	40	Брожение в металлических резервуарах при скорости ветра 1,5м/сек.	---
		---	112,9	Брожение с охлаждением сусла в теплообменнике (конденсатор воздушного охлаждения)	---

Литература

1. Разуваев В. С., Прида И. А. Оптимизация процесса непрерывного брожения виноградного сусла на мезге при приготовлении крепких винных материалов. / Научно-технический реферативный сборник. Винодельческая промышленность. М, ЦНИИТЭИПищепром, 5, 1982, с. 16-21.
2. Razouvaev V. S., Valouiko G. G., Kozlovski Y. V., Prida I. A. Modele mathematique du processus de fermentation alcoolique du mout de raisin (de la vendange). Office international de la vigne et du vin, 1983, D.G.108/(1160/83).
3. Razouvaev V. S. Intensification du processus de fermentation alcoolique de mout de raisin. Traitement industriel du raisin — reussites pratiques et scientifiques dans production de vins, brandies, vermouths, aperitifs et vins mousseux naturels (Rapports de la III-me conference nationale scientifique et technique avec une participation internationale), Vinprom, Pomorie (Bulgarie), 1984, p. 103-109.
4. Разуваев В. С. Биоинженерия виноделия. / Брошюра, М, ЦНИИТЭИ Пищепром, 8, 1985, 25 с.
5. Разуваев В. С. Рождение вина: стехиометрия. / Виноград, Киев, 4, 2010, с. 62-64.