

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ КОМБИКОРМОВ

А.Э. Кошак, А.В. Иванов, Ж.В. Кошак

В работе рассматривается процесс гранулирования комбикормов. Выделены основные независимые факторы, оказывающие влияние на удельную энергоёмкость процесса гранулирования, такие как диаметр отверстий матрицы, вид комбикорма, удельный расход пара. Получены математические модели, описывающие процесс гранулирования с точки зрения удельной энергоёмкости процесса.

Введение

На основании литературных данных [1,2] и собственных проведенных исследований был выделен ряд факторов, оказывающих существенное влияние на энергоёмкость процесса гранулирования комбикормов. По степени влияния на энергоёмкость процесса эти факторы можно разделить на две большие группы:

- эксплуатационные факторы;
- технологические факторы.

К эксплуатационным факторам можно отнести следующие: диаметр отверстий матрицы, конструктивные и кинематические параметры пресс-гранулятора, состояние рабочей поверхности прессующих роликов, рабочее давление в матрице на продукт, расстояние между поверхностью роликов и матрицей, равномерность распределения обрабатываемого продукта по рабочей поверхности роликов и матрицы, износ поверхности матрицы.

К технологическим факторам можно отнести следующие: состав комбикорма (содержание шротов и масел, содержание минерального сырья, содержание зерновых культур), режимы гранулирования (давление и удельный расход пара), гранулометрический состав гранулируемой смеси.

Для определения энергетических показателей процесса гранулирования выбран показатель удельная энергоёмкость процесса гранулирования.

На основании экспериментов нами получены данные, позволяющие оценить удельную энергоёмкость процесса гранулирования при различных типах выпускаемого комбикорма. При исследованиях выделен ряд факторов, которые должны оказывать влияние на удельную энергоёмкость процесса гранулирования, таких как: диаметр отверстий матрицы, удельный расход пара на процесс гранулирования, состав комбикорма (содержание шротов и масел, содержание минерального сырья, содержание зерновых культур), производительность пресс-гранулятора, износ поверхности матрицы.

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе экспериментальных исследований определено влияние диаметра отверстий матрицы на удельную энергоёмкость процесса гранулирования. Например, при гранулировании одного и того же комбикорма КД-II-5 (ЭКМ 14) на матрицах с диаметром отверстий 3,8 и 4,7 мм при различной производительности получено, что чем выше производительность, тем ниже удельная энергоёмкость процесса гранулирования с увеличением диаметра отверстий матрицы. Получена аналитическая зависимость удельной энергоёмкости пресс-гранулятора от производительности при различном диаметре отверстий матрицы, которая имеет вид:

$$P_{уд} = A \cdot Q_{гр} + B \quad (1)$$

В таблице 1 приведены параметры уравнения (1).

На основании аналитической зависимости (1) получено, что чем выше производительность пресс-гранулятора, тем большее влияние оказывает диаметр отверстий матрицы на удельную энергоёмкость процесса. При производительности пресс-гранулятора 6 т/ч и диа-

метром отверстий матрицы 4,7 мм удельная энергоёмкость процесса гранулирования ниже на 14,3 %, чем с матрицей, диаметр отверстий которой равен 3,8 мм, а при производительности пресс-гранулятора 14,3 т/ч удельная энергоёмкость процесса гранулирования с матрицей, диаметр отверстий которой равен 4,7 мм ниже на 19,6 % по сравнению с удельной энергоёмкостью процесса гранулирования при диаметре отверстий матрицы 3,8 мм.

Таблица 1 – Параметры уравнения (1)

Показатели	Значения	
Диаметр отверстий матрицы, мм	3,8	4,5
Коэффициент А, (ч ² ·кВт)/т ²	-1,45	-1,32
Коэффициент В, кВт·ч/т	31,82	27,77
Значения коэффициента детерминации, R ²	0,999	0,998

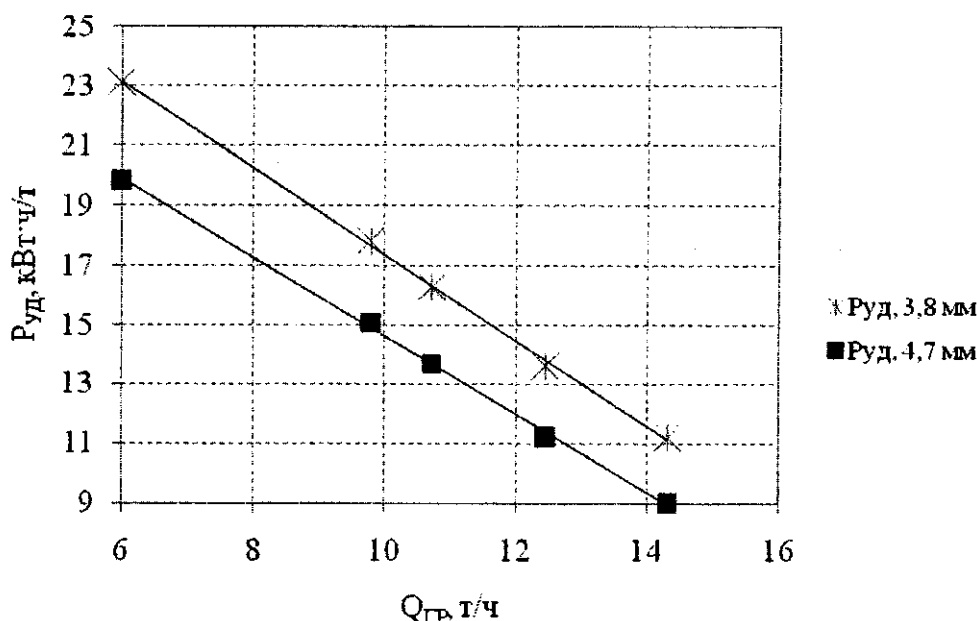


Рисунок 1 – Зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от производительности пресс-гранулятора при различных диаметрах отверстий матрицы

График изменения удельной энергоёмкости процесса гранулирования от производительности при разных диаметрах отверстий матриц представлен на рисунке 1. Уравнение (1) позволяет прогнозировать удельную энергоёмкость процесса гранулирования при изменении производительности пресс-гранулятора с высокой достоверностью результатов (коэффициент детерминации равен 0,99).

Определены данные по влиянию диаметра отверстий матрицы на удельную энергоёмкость процесса при производстве различных видов комбикорма, которые представлены в таблице 2. Из таблицы 2 видно, что с увеличением диаметра отверстий матрицы удельная энергоёмкость процесса гранулирования снижается. При определении удельной энергоёмкости процесса поддерживались одинаковые технологические режимы гранулирования.

Удельный расход пара оказывает влияние не только на удельную энергоёмкость процесса гранулирования, но и на качество гранулированного комбикорма. С изменением удельного расхода пара изменяется удельная энергоёмкость процесса гранулирования. При воздействии пара на массу комбикорма комбикорм в зависимости от состава ведет себя по-разному. Поэтому необходимо подбирать оптимальный удельный расход пара индивидуально по отношению к каждому комбикорму.

Удельный расход пара определялся по формуле

$$F = \frac{Q_{ГР} \cdot (W_{ПР} - W_{ИСК}) \cdot 1000}{100 - W_{ПР}}, \quad (2)$$

где F – удельный расход пара, кг/т;

$Q_{ГР}$ – производительность пресс-гранулятора, т/ч

$W_{ГР}$ – влажность пропаренного комбикорма, %;

$W_{исх}$ – исходная влажность комбикорма, %.

Таблица 2 – Влияние диаметра отверстий матрицы на удельную энергоемкость процесса гранулирования

Показатель	Производительность пресс-гранулятора, т/ч									
	6		8		9		12		15	
Диаметр отверстий матрицы, мм	3,8	4,7	3,8	4,7	3,8	4,7	3,8	4,7	3,8	4,7
Рецепт	КД-П-6(ЭКМ 26)									
$R_{уд}$, кВт·ч/т	26,1	22,8	19,3	19	18,2	17,5	12,2	11,1	10,4	8,6
Рецепт	КД-П-1-15 (ЭКМ 3)									
$R_{уд}$, кВт·ч/т	29,8	28,3	25,3	22	19,2	18	17,5	16,3	15,4	14
Рецепт	КД-С-11 (ЭКМ 31)									
$R_{уд}$, кВт·ч/т	36	35,5	32,5	31	30,1	29,8	25,6	24,3	22,4	21
Рецепт	КД-П-5-2 (ЭКМ 8)									
$R_{уд}$, кВт·ч/т	24,8	23,6	20,3	20	18,5	17,3	16,8	15,1	13,5	12
Рецепт	ПК 1-14 (ЭКМ3)									
$R_{уд}$, кВт·ч/т	26,8	25,2	22,1	22	20,3	19,4	17,4	16,2	16,1	15

Графическая зависимость удельной энергоемкости процесса гранулирования от удельного расхода пара представлена на рисунке 2. Анализ полученных данных показал, что с увеличением удельного расхода пара на 46,2 % при выпуске комбикорма КД-П-5 (ЭКМ 23) при производительности пресс-гранулятора 12,3 т/ч удельная энергоемкость снижается на 7,2 %. Найдена аналитическая зависимость, описывающая влияние удельного расхода пара на удельную энергоемкость процесса гранулирования комбикормов, которая имеет вид

$$R_{уд} = -0,041 \cdot F + 13,68, \quad (3)$$

где $R_{уд}$ – удельная энергоемкость процесса гранулирования, кВт·ч/т;

F – удельный расход пара, кг/т.

Показатель крошимости гранул является одним из основных качественных показателей процесса гранулирования. Чем ниже крошимость гранул, тем выше их прочность. На основании проведенных исследований было получено, что с увеличением удельного расхода пара крошимость гранул снижается. Графическая зависимость крошимости гранул комбикорма КД-П-5 (ЭКМ 23) представлена на рисунке 3.

Анализируя представленную графическую зависимость, отметим, что при увеличении удельного расхода пара на 46,2 % при выработке комбикорма КД-П-5 (ЭКМ 23) крошимость гранул уменьшается на 50 %, что повышает эффективность скармливания данного вида комбикорма животным. Аналитическая зависимость крошимости гранул комбикорма КД-П-5 (ЭКМ 23) от удельного расхода пара имеет вид

$$K = 0,007 \cdot F^2 - 0,768 \cdot F + 24,28, \quad (4)$$

где K – крошимость гранул, %;

F – удельный расход пара, кг/т.

Содержание шротов и масел в рецепте существенно влияет на удельную энергоемкость процесса гранулирования. На основании проведенных исследований нами получено, что чем больше масел и шротов содержится в рецепте, тем ниже удельная энергоемкость процесса гранулирования кормов. Был исследован ряд рецептов с точки зрения удельной энергоемкости процесса, результаты по некоторым комбикормам представлены в таблице 3.

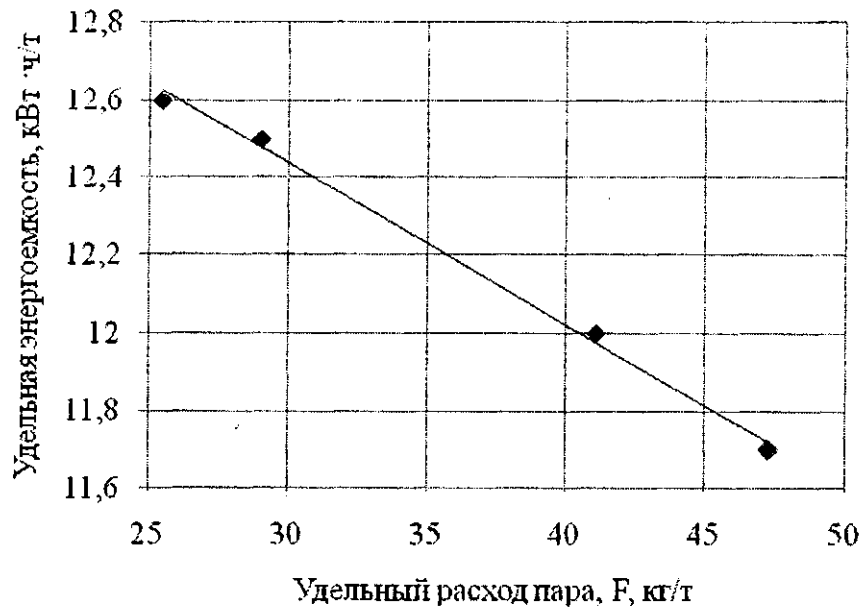


Рисунок 2 – Зависимость удельной энергоемкости процесса гранулирования от удельного расхода пара

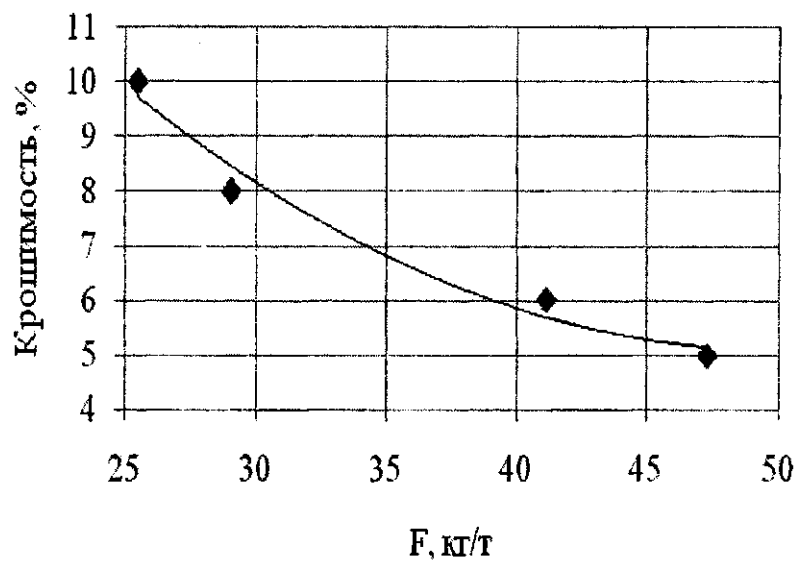


Рисунок 3 – Зависимость крошимости гранул от удельного расхода пара

При исследовании удельной энергоемкости процесса гранулирования при выпуске различных комбикормов, с различным содержанием компонентов в рецепте расход пара и производительность пресс-грануляторов была постоянна для исключения влияния данных факторов на удельную энергоемкость процесса. На основании полученных данных можно отметить, что с увеличением содержания зерновых культур в рецепте комбикорма на 35,2 %, с уменьшением содержания шротов и масел на 55,6 % и с увеличением содержания минерального сырья на 68,4 % удельная энергоемкость процесса гранулирования возрастает на 53,5 %.

Проведены исследования влияния содержания шротов и масел в рецепте при постоянном содержании зерновых культур (54,68 %) и минерального сырья (2,75 %) в рецепте КД-П-5. Расход пара и производительность пресс-гранулятора постоянны и равны соответственно 43 кг/т и 7,8 т/ч. Получено, что с увеличением содержания шротов и масел в рецепте комбикорма на 7,2 % приводит к снижению удельной энергоемкости процесса гранулирования на

18,1 %. Графическая зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от содержания шротов и масел в рецепте комбикорма представлена на рисунке 4.

Таблица 3 – Содержание компонентов в некоторых рецептах комбикормов и удельная энергоёмкость процесса гранулирования, расход пара и производительность пресс-гранулятора

Рецепт	Содержание зерновых культур, %	Содержание шротов и масел, %	Содержание минерального сырья, %	$R_{уд}$, кВт·ч/т	F, кг/т	$Q_{гр}$, т/ч
КД-П-6 (ЭКМ 23)	46,42	33,2	2,95	12,6	43	7
КД-П-5 (ЭКМ23)	54,68	37,67	2,75	19,5	43	7,3
КД-П-5 (ЭКМ 60)	55,7	40,6	3,5	22	43	7
ПК 1-14 (ЭКМ 3)	59,48	29,6	10,8	26,1	43	7
КД-П-1-15 (ЭКМ 3)	66,4	21,8	10,12	25,8	43	7,1
КД-П-1-15 (ЭКМ 11)	71,59	14,75	9,35	27,1	43	7

Аналитическая зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от содержания шротов и масел в комбикорме имеет вид

$$R_{уд} = -0,746C_{шр_м} + 47,40, \tag{5}$$

где $R_{уд}$ – удельная энергоёмкость процесса гранулирования, кВт·ч/т;

$C_{шр_м}$ – содержание шротов и масел в комбикорме, %.

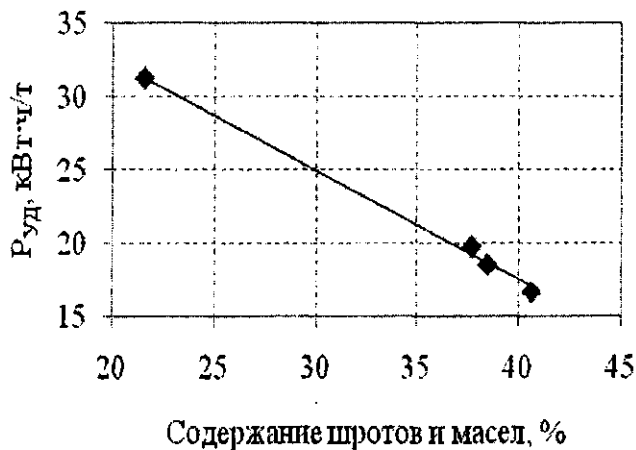


Рисунок 4 – Зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от содержания шротов и масел в комбикорме

С увеличением содержания шротов и масел в рецепте комбикорма облегчается процесс гранулирования и снижается удельная энергоёмкость процесса.

При исследовании влияния содержания зерновых культур в комбикорме выбраны рецепты, в которых содержится шротов и масел в рецепте составило 33,2 %, минерального сырья - 2,95 %, при этом содержание зерновых культур в рецепте комбикормов изменялось с 46,42 % до 71,59 %. Удельный расход пара составлял 43 кг/т и производительность пресс-гранулятора 7,8 т/ч. Графическая зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от содержания зерновых культур в рецепте комбикорма представлена на рисунке 5.

Анализируя представленные данные, следует отметить, что при увеличении содержания зерновых культур в рецепте комбикорма на 35,16 % удельная энергоёмкость процесса гранулирования увеличивается на 60,13 %. Чем больше зерновых культур содержится в комбикорме, тем больше удельная энергоёмкость процесса.

Аналитическая зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от содержания зерновых культур в комбикорме имеет вид

$$R_{уд} = 0,776C_з - 23,39, \tag{6}$$

где $R_{уд}$ – удельная энергоёмкость процесса гранулирования, кВт·ч/т;

$C_з$ – содержание зерновых культур в комбикорме, %.

При исследовании влияния содержания минерального сырья в комбикорме выбраны рецепты комбикормов, в которых содержание шротов и масел в рецепте составило 34,52 %, содержание зерновых культур в рецепте комбикормов составляло 57,49 %, содержание мине-

рального сырья, главным образом абразивного мела, изменялось с 1,73 до 10,05 % в зависимости от вида комбикорма. Удельный расход пара составлял 43 кг/т и производительность пресс-гранулятора 7,8 т/ч.

Графическая зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от содержания минерального сырья в рецепте комбикорма представлена на рисунке 6. При увеличении содержания минерального сырья (мела) в рецепте комбикорма на 82,8 % удельная энергоёмкость процесса гранулирования увеличивается на 63,5 %.

Аналитическая зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от содержания минерального сырья имеет вид:

$$P_{уд} = 1,933C_{мин} + 7,333, \quad (7)$$

где $P_{уд}$ – удельная энергоёмкость процесса гранулирования, кВт·ч/т;
 $C_{мин}$ – содержание минерального сырья в комбикорме, %.

Чем больше минерального сырья содержится в комбикорме, тем тяжелее проходит комбикорм через отверстия матрицы, т.к. мел является абразивным материалом и тем самым удельная энергоёмкость процесса увеличивается существенно.

Все полученные уравнения (5)–(7) позволяют прогнозировать удельную энергоёмкость процесса гранулирования в зависимости от содержания в комбикорме шротов и масел, зерновых культур, минерального сырья с высокой степенью точности (коэффициент детерминации R^2 равен 0,98).

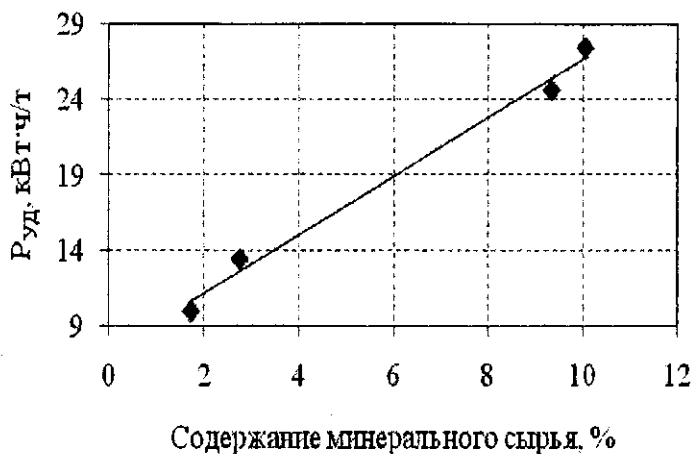


Рисунок 6 - Зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от содержания минерального сырья в комбикорме

$$P_{уд} = -0,15Q_{гр}^2 + 2,33Q_{гр} + 7,69. \quad (8)$$

Графическая зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от производительности пресс-гранулятора представлена на рисунке 7.

На основании экспериментальных данных для различных рецептов построен график (рисунки 8), отражающий динамику изменения удельной энергоёмкости процесса гранулирования

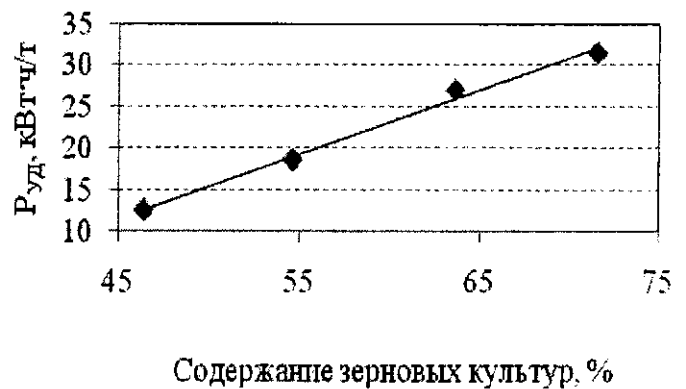


Рисунок 5 – Зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от содержания зерновых культур в комбикорме

Еще одним фактором, существенно влияющим на удельную энергоёмкость процесса гранулирования, является производительность пресс-гранулятора. Исследовано влияние производительности на удельную энергоёмкость процесса на различных комбикормах. Получено для комбикорма КД-П-5 (ЭКМ 14), что с увеличением производительности пресс-гранулятора на 47,2% удельная энергоёмкость уменьшается на 38,6%. При этом удельный расход пара на гранулирование составлял 45 кг/т. Аналитическая зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от производительности пресс-гранулятора при выпуске комбикорма КД-П-5 (ЭКМ 14) имеет вид

ния в зависимости от содержания зерновых культур и содержания шротов и масел в рецепте.

При помощи программы Statistica подобрана математическая модель, описывающая влияние содержания зерновых культур, шротов и масел в комбикорме.

С помощью уравнения (9) можно предсказать поведение удельной энергоёмкости с увеличением содержания данных компонентов в комбикорме.

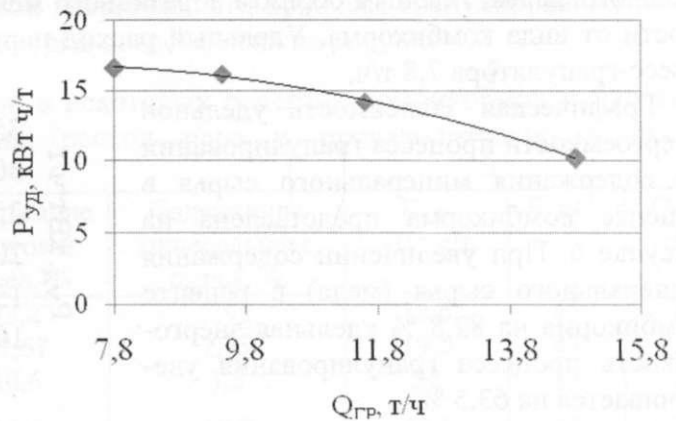


Рисунок 7 - Зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от производительности пресс-гранулятора

$$P_{уд} = 510,34 - 12,464C_3 - 11,451C_{ш_м} + 0,0796C_3^2 + 0,1501C_3C_{ш_м} + 0,0527C_{ш_м}^2, \quad (9)$$

где P_{уд} – удельная энергоёмкость процесса гранулирования, кВт·ч/т;

C₃ – содержание зерновых культур в комбикорме, %;

C_{ш_м} – содержание шротов и масел в комбикорме, %.

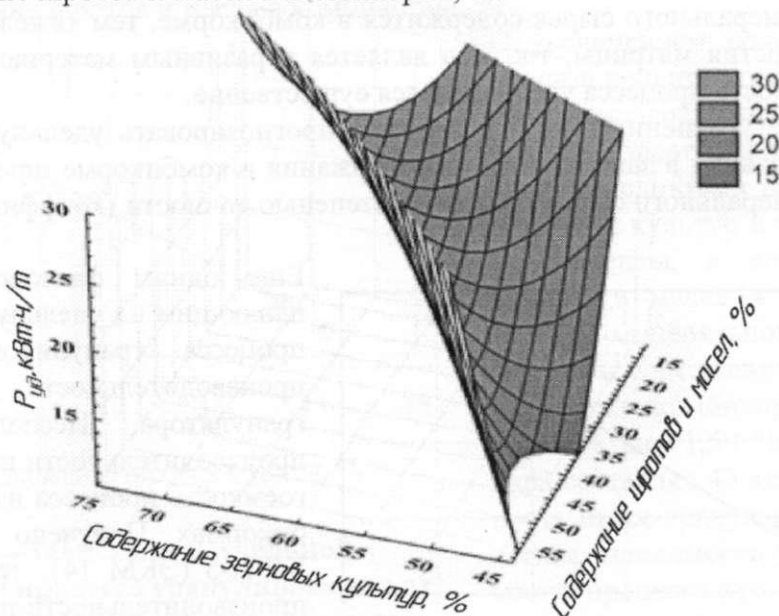


Рисунок 8 – Зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от содержания зерновых культур и шротов и масел в комбикорме

Из рисунка 8 видно, что наименьшая удельная энергоёмкость достигается при содержании шротов и масел в комбикорме от 35 до 55 % и при содержании зерновых культур от 45 до 60 %. При дальнейшем увеличении содержания шротов и масел и зерновых культур происходит увеличение удельной энергоёмкости процесса.

На основе полученных экспериментальных данных получена аналитическая модель, описывающая зависимость удельной энергоёмкости процесса гранулирования от содержания минерального и зернового сырья в комбикорме. Математическая модель имеет вид

$$P_{уд} = -7,64 - 1,248C_3 + 18,837C_{мин} + 0,03C_3^2 - 0,309C_3C_{мин} + 0,0047C_{мин}^2, \quad (10)$$

где P_{уд} – удельная энергоёмкость процесса гранулирования, кВт·ч/т;

C₃ – содержание зерновых культур в комбикорме, %;

C_{мин} – содержание минерального сырья в комбикорме, %.

График зависимости удельной энергоемкости процесса гранулирования от содержания минерального и зернового сырья в комбикорме представлен на рисунке 9.

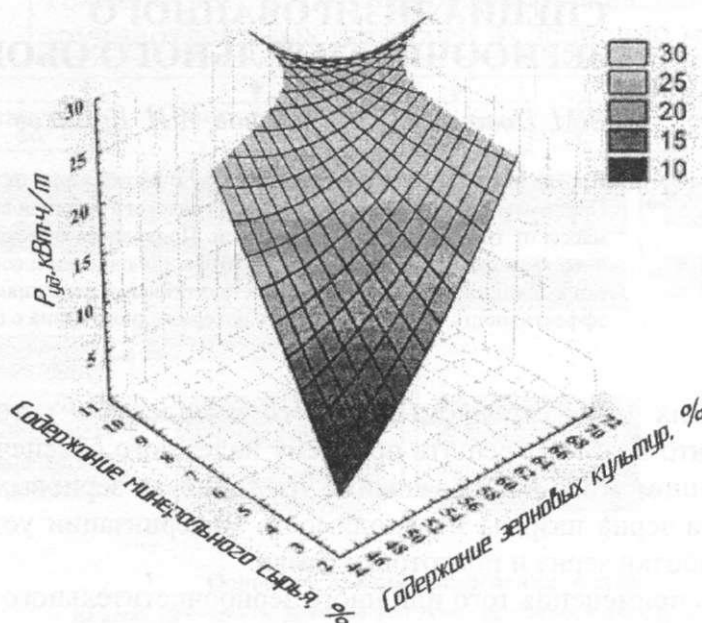


Рисунок 9 – Зависимость удельной энергоемкости процесса гранулирования от содержания зерновых культур и минерального сырья в комбикорме

Минимальная удельная энергоемкость процесса гранулирования достигается при минимальном содержании зерновых культур и минерального сырья. Оптимальная удельная энергоемкость равна 10 кВт·ч/т при содержании зерновых культур в диапазоне 44–46 % и минерального сырья – 0,01–2 %.

Заключение

Установлено, что на удельную энергоемкость процесса гранулирования существенное влияние оказывает состав комбикорма, диаметр отверстий матрицы, удельный расход пара, а также производительность пресс-гранулятора. Построены математические модели, описывающие процесс гранулирования с точки зрения удельной энергоемкости. Получено, что оптимальная удельная энергоемкость – это минимальная удельная энергоемкость процесса, и она достигается при содержании зерновых культур в комбикорме до 46 %, минерального сырья – до 2 %, шротов и масел – 35–55 %, удельный расход пара не ниже 40 кг/т, а производительность пресс-гранулятора не ниже 9 т/ч.

Литература

1. Хажинский, М.А. Экономико-математическая модель процесса гранулирования комбикормов / М.А. Хажинский, П.И. Телес / ЦНИИТЭИ Минзага СССР. Сер. «Экономика и организация производства». – 24 с.
2. Любимов, С.П. Пути совершенствования техники для гранулирования комбикормов / С.П. Любимов, С.А. Штернина / ЦНИИТЭИ хлебопродуктов. Сер. Комбикормовая промышленность. – 1992. – 16 с.

Поступила в редакцию 10.09.2009