

УДК 631.363.23

П. А. Савиных**Зональный научно-исследовательский институт
сельского хозяйства северо-востока имени Н. В. Рудницкого, Киров****С. Ю. Булатов, Р. А. Смирнов****Нижегородский государственный инженерно-экономический
университет, Нижегородская обл., Княгинино****ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ КОРНЕКЛУБНЕПЛОДОВ**

В статье представлены результаты экспериментальных исследований по оптимизации рабочих параметров измельчителя корнеклубнеплодов. Серия однофакторных экспериментов позволила определить зоны оптимизации исследуемых факторов. С помощью методов активного планирования проведена оптимизация изучаемых факторов. Рекомендованы следующие оптимальные значения: угол резания горизонтальных ножей $\alpha = 45^\circ$, количество горизонтальных ножей $N = 3$ и скорость резания $V_p = 12$ м/с при измельчении корнеклубнеплодов для птицы; угол резания горизонтальных ножей $\alpha = 25^\circ$, количество горизонтальных ножей $N = 2$ и скорость резания $V_p = 12$ м/с при измельчении корнеклубнеплодов для КРС; угол резания горизонтальных ножей $\alpha = 35^\circ$, количество горизонтальных ножей $N = 2$ и скорость резания $V_p = 10$ м/с при измельчении корнеклубнеплодов для свиней.

Ключевые слова: измельчение, корнеклубнеплоды, критерий оптимизации, результат, фактор, эксперимент.

На первом этапе экспериментальных исследований изучался вопрос о работоспособности разработанного измельчителя корнеклубнеплодов при использовании различных вариантов режущего диска и определении наиболее перспективной конструктивно-технологической схемы измельчителя.

Изучалось влияние частоты вращения n режущего диска и количества горизонтальных ножей N на рабочие характеристики измельчителя. Для этого была проведена серия однофакторных экспериментов.

Исследования проводились в лаборатории «Сельскохозяйственные машины» ГОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» на картофеле урожая 2014 года. Общий вид экспериментальной установки с приборами и оборудованием приведен на рисунке 1.

На рисунке 2а представлен общий вид режущих дисков с одним и двумя режущими горизонтальными ножами с углом наклона $\alpha = 45^\circ$ (рис. 2б). Угол наклона β вертикальных ножей на обоих дисках составлял 45° (рис. 2б). Углы наклона горизонтальных и вертикальных ножей в 45° выбраны как максимально рекомендованные значения углов резания ножей [3].



Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки с приборами и оборудованием

Испытания проводили на картофеле, диаметр клубней которого составлял 43...45 мм. Частоту вращения режущего диска задавали равной 1150 мин^{-1} , 1128 мин^{-1} , 880 мин^{-1} , 711 мин^{-1} и 573 мин^{-1} .

Работу измельчителя корнеклубнеплодов оценивали его производительностью, удельными энергозатратами на измельчение и процентным содержанием частиц измельченной фракции 3...15 мм.

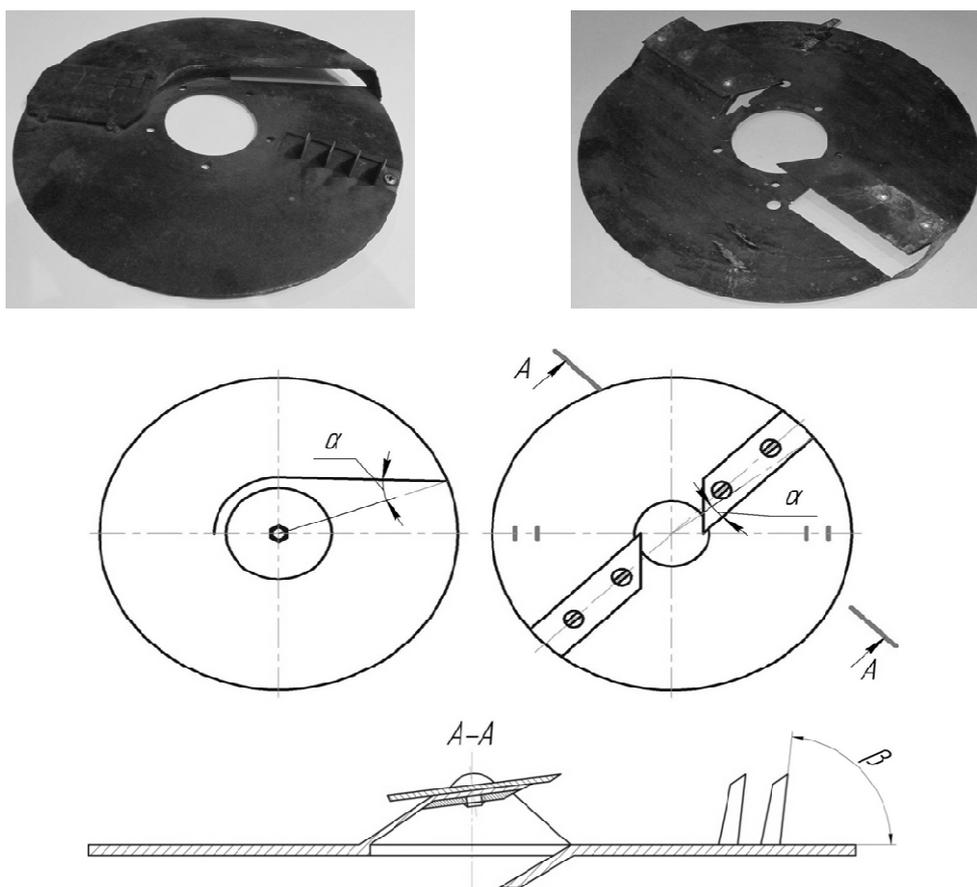


Рис. 2. Режущие диски с одним и двумя горизонтальными ножами:
 а – общий вид; б – схема расположения горизонтальных ножей

Анализ полученных зависимостей (рис. 3, 4) показывает, что при максимальной частоте вращения режущего диска $n = 1150 \text{ мин}^{-1}$ в обоих случаях производительность максимальна ($Q = 540 \text{ кг/ч}$ при резании одним ножом и $Q = 720 \text{ кг/ч}$ при резании двумя ножами), а удельные энерго-

затраты минимальны ($\mathcal{E} = 93 \text{ Вт}\cdot\text{ч/т}$ при резании одним ножом и $\mathcal{E} = 56 \text{ Вт}\cdot\text{ч/т}$ – двумя) при резании двумя ножами. Число частиц с размером $3 \dots 15 \text{ мм}$ при резании одним ножом составляет $\Theta = 50 \%$, двумя ножами – $\Theta = 54 \%$.

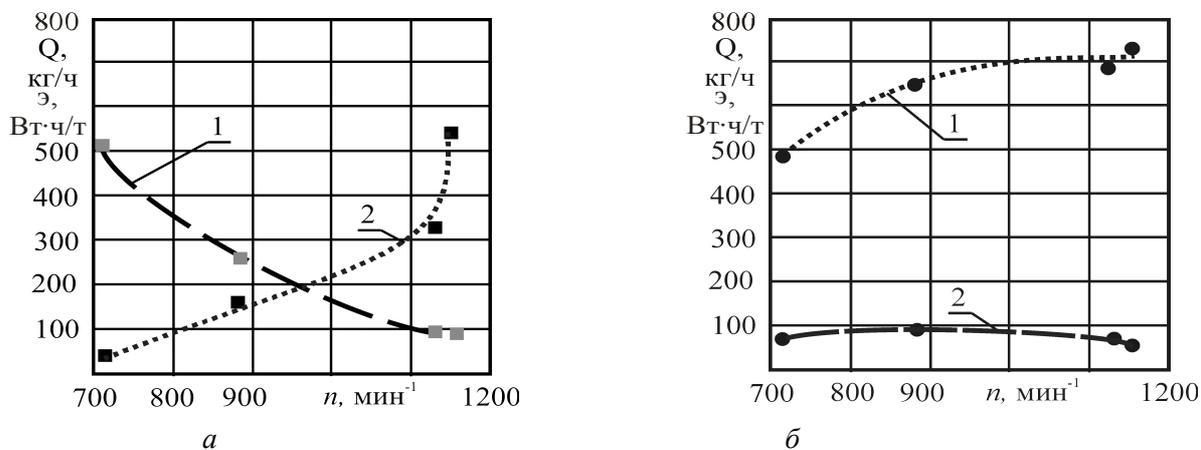


Рис. 3. Зависимости производительности измельчителя и его удельной энергоёмкости при измельчении:
 а – одним горизонтальным ножом; б – двумя горизонтальными ножами;
 1 – производительность измельчителя; 2 – удельные энергозатраты

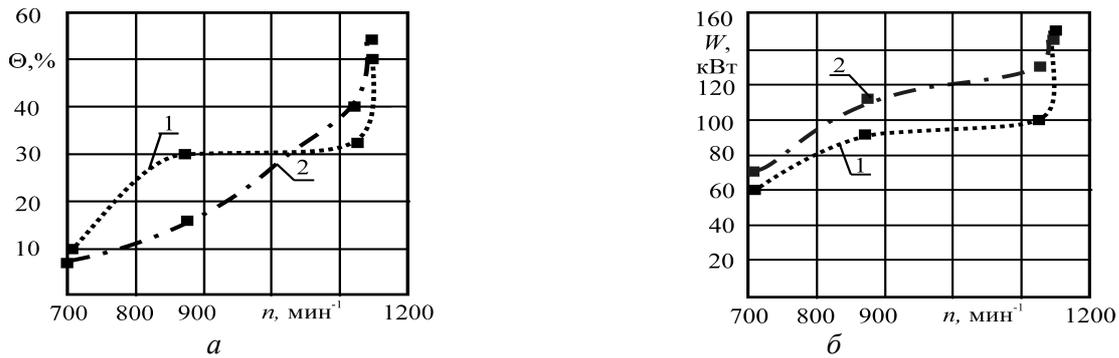


Рис. 4. Зависимости: а) процентного содержания частиц 3...15 мм Θ ; б) потребляемой мощности W при измельчении: 1 – одним горизонтальным ножом; 2 – двумя горизонтальными ножами

Таким образом, на основании проведенных исследований рабочего процесса измельчителя корнеклубнеплодов можно сделать вывод, что с целью снижения удельных энергозатрат и увеличения производительности установки необходимо увеличивать количество горизонтальных ножей и скорость резания.

После проведения однофакторных экспериментов с целью установления оптимальных конструктивных параметров измельчителя корнеклубнеплодов проведены исследования методом активного эксперимента. Оценивалось влияние четырех факторов на три критерия оптимизации.

На первом этапе нами был реализован полный четырехфакторный план 2^4 . Уровни варьирования факторов приведены в таблице 1, матрица плана и результаты экспериментальных исследований – в таблице 2.

Фактор x_2 (скорость резания ножей) изменяли, основываясь на результатах однофакторных экспериментов. Уровни варьирования угла наклона α (рис. 1а) горизонтальных ножей (фактор x_3) приняты согласно рекомендациям [3]. Угол наклона β вертикальных ножей (рис. 2б) назначали из условия незащемления клубней, а также, исходя из особенностей конструкции измельчителя.

Таблица 1

Уровни варьирования факторов

Нормированные значения факторов	Наименование факторов и обозначения	Уровни варьирования факторов	
		+1	-1
x_1	Количество ножей N , шт.	2	1
x_2	Скорость резания V_p , м/с	9	10,5
x_3	Угол резания горизонтальных ножей α , град	25	35
x_4	Угол резания вертикальных ножей β , град	45	75

Таблица 2

Матрица плана и результаты эксперимента

№ п/п	Факторы				Критерии оптимизации		
	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3
	количество горизонтальных ножей N	скорость резания V_p , м/с	угол наклона горизонтальных ножей α , град	угол наклона вертикальных ножей β , град	производительность Q , кг/ч	удельная энергоёмкость процесса Θ , Вт·ч/т	количество частиц размером 3...15 мм Θ , %
Уровни варьирования	1 2	9 10,5	35 45	45 75			
1	-	-	-	-	154	259,7	40
2	+	-	-	-	648	92,6	30
3	-	+	-	-	178	220,1	45
4	+	+	-	-	684	73,1	40
5	-	-	+	-	173	255,3	53
6	+	-	+	-	683	90,5	38,8
7	-	+	+	-	327	91,7	32,1
8	+	+	+	-	735	70,6	49
9	-	-	-	+	154	260	40
10	+	-	-	+	648	93,3	30
11	-	+	-	+	178	223	45
12	+	+	-	+	684	74,4	40
13	-	-	+	+	173	258,2	53
14	+	-	+	+	683	92,1	38,8
15	-	+	+	+	327	93,2	32,1
16	+	+	+	+	735	72,1	49

После реализации опытов и обработки экспериментальных данных рассчитаны оценки коэффициентов регрессии и получены математические модели:

$$y_1 = 447,75 + 239,75 x_1 + 33,25 x_2 + 31,75 x_3 + 18,25 x_2 x_3 \quad (1)$$

$$y_2 = 144,99 + 62,65 x_1 - 30,22 x_2 - 17,03 x_3 + 20,43 x_1 x_2 + 16,18 x_1 x_3 - 15,84 x_2 x_3 \quad (2)$$

$$y_3 = 40,99 - 1,54 x_1 + 0,54 x_2 + 2,24 x_3 + 4,51 x_1 x_2 + 2,21 x_1 x_3 - 3,21 x_2 x_3 \quad (3)$$

Коэффициенты регрессии с абсолютной величиной, меньшей доверительного интервала, исключены из моделей регрессии. Анализ модели (1) показывает, что на производительность измельчителя наибольшее влияние оказывает количество ножей ($b_1 = 239,75$), с его увеличением наблюдается рост производительности установки.

На энергоемкость процесса (2) наибольшее влияние также оказывает фактор x_1 ($b_1 = 62,65$), с увеличением количества ножей энергоемкость процесса увеличивается.

На увеличение содержания фракции 3...15 мм наиболее значимо влияет фактор x_3 – угол наклона горизонтальных ножей ($b_3 = 2,24$), при его увеличении содержание нужной фракции увеличивается.

Анализ математических моделей (1), (2), (3) показал, что фактор x_4 – угол резания вертикальных ножей, в данных опытах оказался незначимым.

Проведенные исследования показали, что из четырех исследуемых факторов такие эффекты как количество горизонтальных ножей, скорость резания и угол резания горизонтальных ножей, а также большинство их парных взаимодействий оказывают существенное влияние на показатели работы измельчителя корнеклубнеплодов. Поэтому с целью изучения и описания области оптимума линейного приближения недостаточно, и необходимо использовать планирование второго порядка. Поэтому была реализована матрица плана Бокса-Бенкина для 3 факторов.

Количество горизонтальных ножей N изменяли от 1 до 3. Для этого был изготовлен дополнительный режущий диск с тремя горизонтальными ножами (рис. 5).

Скорость резания V_p изменяли от 9 до 12,5 м/с с интервалом 1,5 м/с, а угол резания горизонтальных ножей α – от 25 до 45° с шагом 10°.



Рис. 5. Режущий диск измельчителя корнеклубнеплодов с тремя горизонтальными ножами

Матрица плана, уровни варьирования факторов и результаты исследований приведены в таблице 3.

После реализации опытов по плану и обработки экспериментальных данных получены математические модели в раскодированном виде:

$$y_1 = -2211,9 + 1625,6N + 165,7V_p - 196,5N^2 - 61,2N \cdot V_p; \quad (4)$$

$$y_2 = 1358 - 619,1N - 74,7V_p - 6,7N^2 + 43,6\alpha + 26,9N \cdot V_p + 3,3N \cdot \alpha; \quad (5)$$

$$y_3 = 217,8 - 39,8N - 25V_p - 2,4\alpha + 9,95N^2 + 0,9V_p \cdot \alpha - 0,08\alpha^2 \quad (6)$$

Незначимые коэффициенты регрессии, то есть абсолютная величина которых меньше доверительного интервала, исключены из моделей регрессии. Адекватность полученных моделей проверяли с помощью критерия Фишера. Полученные математические модели регрессии адекватны с 95 %-й вероятностью.

Анализ модели (6) процентного содержания фракции 3...15 мм, показывает, что наибольшее влияние на критерий оптимизации оказывает количество горизонтальных ножей ($b_1 = -39,8$, $b_{11} = 9,95$).

Энергоемкость процесса (5) также значительно зависит от количества горизонтальных ножей ($b_1 = -619,1$) – с их увеличением энергоемкость процесса снижается. Увеличение скорости резания ($b_1 = -74,4$) снижает энергозатраты.

На производительность установки (4) наибольшее влияние оказывает ($b_1 = -196,5$) количество горизонтальных ножей.

Таблица 3

Матрица плана Бокса – Бенкина для 3 факторов и результаты экспериментальных исследований

№ п/п	Факторы			Производительность Q , кг/ч	Энергоемкость процесса \mathcal{E} , Вт·ч/т	Содержание частиц размером 3...15 мм, %
	количество горизонтальных ножей N	скорость резания V_p , м/с	угол резания горизонтальных ножей α , град			
	x_1	x_2	x_3			
Верхний уровень (+1)	3	12	45			
Основной уровень (0)	2	10,5	35			
Нижний уровень (-)	1	9	25			
1	0	0	0	735	72,1	49
2	-1	-1	0	173	255,3	53
3	1	-1	0	714	74,1	48
4	-1	1	0	550	87,9	64,4
5	1	1	0	724	68,3	67,5
6	-1	0	-1	178	220,1	45
7	1	0	-1	697	73,5	47,5
8	0	0	0	735	72,1	49
9	-1	0	1	357	92,1	59
10	1	0	1	701	79,2	52,4
11	0	-1	-1	648	92,6	30
12	0	1	-1	720	55	17,9
13	0	-1	1	662	101,2	37,3
14	0	1	1	723	61,7	76,4
15	0	0	0	735	72,1	49

Анализ математических моделей и поиск оптимальных значений факторов проводили также графоаналитическим способом с помощью наложения двумерных сечений.

На рисунке 6а представлены двумерные сечения зависимостей критериев оптимизации от количества горизонтальных ножей N и скорости ре-

зания V_p при фиксированном значении фактора x_3 на нулевом уровне. Из анализа двумерных сечений видно, что с увеличением максимальная производительность и минимальные энергозатраты наблюдаются при 2...3 горизонтальных ножах и максимальной скорости резания. При этом количество фракции 3...15 мм составляет 49...65 %.

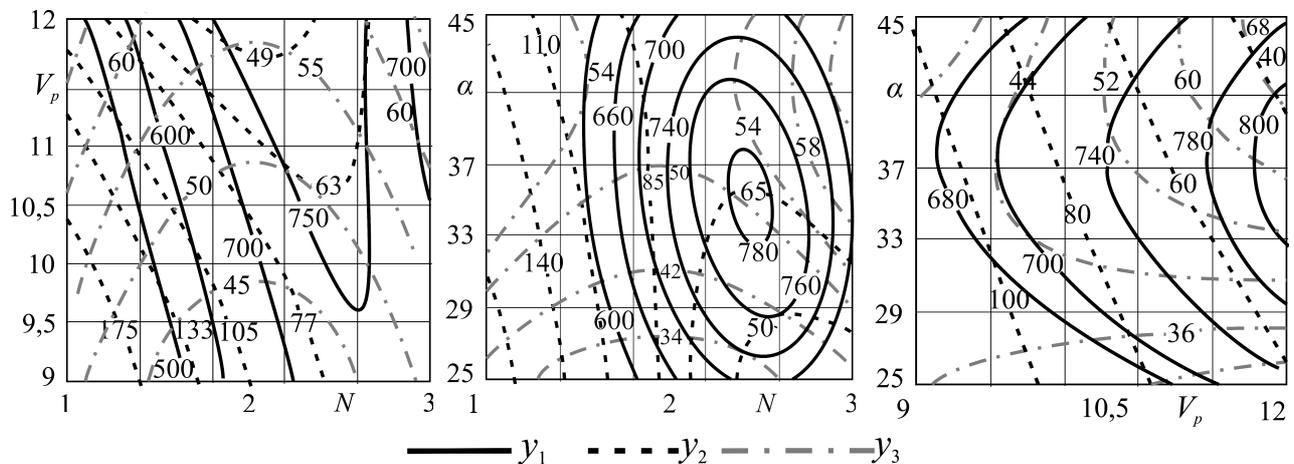


Рис. 6. Двумерные сечения поверхности отклика, характеризующие содержание частиц размером 3...15 мм, энергоёмкость процесса и производительность

Анализ двумерных сечений (рис. 6б) в координатах количества горизонтальных ножей N и угла резания α показывает, что в интервале $N = 2 \dots 3$ и $\alpha = 30 \dots 37^\circ$ наблюдаются наилучшие условия резания: максимальная производительность $Q = 750$ кг/ч, максимальное содержание частиц размером 3...15 мм, равное 42...58 %. Энергозатраты при этом составляют 50...65 Вт·ч/т.

Двумерные сечения (рис. 6в) показывают, что лучшие показатели критериев оптимизации достигаются, при максимальных значениях факторов x_2 и x_3 .

С помощью программы Portable Statgraphics Centurion 15.2.11.0 определены значения исследуемых факторов и критериев оптимизации, при которых достигаются необходимые согласно зоотехническим требованиям [1; 2] размеры измельченной фракции для различных видов групп животных (табл. 4).

Таблица 4

Оптимальное сочетание исследуемых факторов при измельчении корнеклубнеплодов для различных видов групп животных

Вид животных	Оптимальное значение фактора			Оптимальное значение критерия оптимизации		
	x_1	x_2	x_3	Q , кг/ч	\mathcal{E} , Вт·ч/т	θ , %
Птицы	3	12	45	692	75	82
Свиньи	2	12	25	753	57	24,5
КРС	2	11	31	765	59	52,5

UDK 631.363.23

P. A. Savinykh

Zone research institute of agriculture the northeast of N. V. Rudnitsky, Kirov

S. Yu. Bulatov, A. R. Smirnov

*Nizhny Novgorod state engineering and economic university,
Nizhny Novgorod Region, Knyaginino*

THE OPTIMIZATION OF THE WORKING PROCESS OF CRUSHER CROPS

The article presents the results of experimental studies on the optimization of the operating parameters of the crusher of roots and tubers. A series of single-factor experiments allowed us to determine areas of optimization of the studied factors. Using the methods of active planning optimization of the studied factors. Recommended the following optimal values: angle horizontal cutting knives $\alpha = 45^\circ$, the number of horizontal blades $N = 3$ and the cutting speed $V_p = 12$ m/s when grinding crops for poultry; angle the horizontal cutting knives $\alpha = 25^\circ$, the number of horizontal blades $N = 2$ and the cutting speed $V_p = 12$ m/s when grinding crops for cattle; cutting angle horizontal knives $\alpha = 35^\circ$, the number of horizontal blades $N = 2$ and the cutting speed $V_p = 10$ m/s when grinding of crops for pigs.

Keywords: grinding, root crops, optimization criterion, result, factor experiment.

Таким образом, в результате исследования измельчителя корнеклубнеплодов с применением методов планирования эксперимента зафиксированы следующие оптимальные значения его параметров: угол резания горизонтальных ножей $\alpha = 45^\circ$, количество горизонтальных ножей $N = 3$ и скорость резания $V_p = 12$ м/с при измельчении корнеклубнеплодов для птицы, угол резания горизонтальных ножей $\alpha = 25^\circ$, количество горизонтальных ножей $N = 2$ и скорость резания $V_p = 12$ м/с при измельчении корнеклубнеплодов для КРС. Угол резания горизонтальных ножей $\alpha = 35^\circ$, количество горизонтальных ножей $N = 2$ и скорость резания $V_p = 10$ м/с при измельчении корнеклубнеплодов для свиней.



1. Завражнов А. И., Николаев Д. И. Механизация приготовления и хранения, кормов. М.: Агропромиздат, 1990. 336 с.
2. Кукта Г. М. Машины и оборудование для приготовления кормов. М.: Агропромиздат, 1987. 303 с.
3. Курдюмов В. И., Аюгин П. Н. Анализ факторов, влияющих на энергоёмкость резания // Нива Поволжья № 3 (8). 2008. С. 57–59.

1. Zavrzhnov A. I., Nikolaev D. I. Mehanizacija prigotovljenija i hranenija, kormov, M.: Agropromizdat, 1990, 336 pp.
2. Kukta G. M. Mashiny i oborudovanie dlja prigotovljenija kormov, M.: Agropromizdat, 1987, 303 pp.
3. Kurdjumov V. I., Ajugin P. N. Analiz faktorov, vlijajushih na jenergoemkost' rezanija, *Niva Povolzh'ja*, No. 3 (8), 2008, pp. 5759.