

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© Заплетников И.Н.\*, Шеина А.В.\*\*, Гордиенко А.В.\*\*\*

Донецкий национальный университет экономики и торговли  
им. Михаила Туган-Барановского, г. Донецк, Украина

Выполнен анализ результатов многофакторного исследования процесса резания растительных материалов пластинчатым ножом с учетом влияния режимов работы овощерезательного оборудования, особенностей конструктивного исполнения ножей и реологических свойств продукта. Приведены рекомендации к усовершенствованию процесса.

**Ключевые слова:** растительные материалы, пластинчатый нож, скорость резания, угол резания, модуль упругости.

В пищевой промышленности процесс резания биологических материалов может осуществляться как технологическая операция, являющаяся обязательной стадией при производстве какого-либо продукта, либо быть завершающим этапом, определяющим его внешний вид в соответствии с требованиями потребителя. Производство нарезанной продукции имеет большую рентабельность, по сравнению с реализацией обычного продукта, что стимулирует производителя увеличивать долю такой продукции на рынке потребления.

Овощерезательное оборудование широко распространено на предприятиях пищевой промышленности и ресторанного хозяйства. Оно может использоваться как самостоятельное технологическое устройство либо входить в состав технологической линии. При этом, огромная конкуренция на рынке предъявляет все более жесткие требования к конструктивным, энергетическим и эксплуатационным характеристикам овощерезательных машин, а так же качественным показателям выполнения самого процесса. Это делает актуальными вопросы всесторонних исследований процесса резания различных пищевых материалов, в том числе растительного происхождения, с целью усовершенствования как самого процесса, так и оборудования, предназначенного для его осуществления.

Исследование процесса резания растительных материалов является задачей со сложной структурой, ввиду большого количества факторов, ока-

---

\* Заведующий кафедрой оборудования пищевых производств, доктор технических наук, профессор.

\*\* Аспирант.

\*\*\* Старший преподаватель, кандидат технических наук.

зывающих влияние на конечный результат. Условно их можно разделить на три группы: факторы, обусловленные структурно-механическими свойствами обрабатываемого продукта; факторы, обусловленные конструктивным исполнением оборудования и рабочих инструментов; факторы, обусловленные режимами работы оборудования [1, 2]. При этом следует учитывать, что все они оказывают сложное взаимовлияние на процесс резания, причем комбинации факторов могут существенно влиять на характер взаимодействия.

С целью установления взаимовлияния режимов резания, геометрических параметров режущего инструмента и структурно-механических свойств продукта на удельные усилия резания материалов растительного происхождения был реализован полный факторный эксперимент вида  $2^3$  [3]. Такая постановка задачи позволяет последовательно получить качественную и количественную оценку влияния установленных факторов на исследуемый процесс. Для проведения экспериментальных исследований были отобраны факторы из различных групп влияния, что позволяет рассмотреть процесс резания в комплексе.

Планирование экспериментального исследования осуществлялось согласно следующих этапов: сбор и анализ априорной информации, выбор входных и выходных переменных, выбор математической модели и метода анализа данных, проведение эксперимента, обработка и анализ экспериментальных данных.

В качестве целевой функции принималось удельное усилие резания пластинчатым ножом  $q_{уд}$ . В качестве варьируемых факторов были выбраны скорость резания  $v$ , угол резания  $\beta$  и модуль упругости  $E$  растительного материала. При этом скорость резания – это скорость режущей кромки лезвия пластинчатого ножа в заданной точке в направлении резания. Это важнейший параметр процесса резания, с которым связана как производительность машины, так и энергоёмкость процесса. Кроме того, это параметр, определяющий режим работы оборудования. За угол резания принимался угол между вектором скорости резания и ее нормальной составляющей. Угол резания определяет вид резания – рубящее или скользящее – и является характеристикой конструктивного исполнения режущего инструмента. Модуль упругости – это коэффициент пропорциональности между напряжением, вызывающим деформацию материала, и величиной самой деформации. Этот параметр является структурно-механической характеристикой исследуемых растительных материалов.

При анализе и выборе факторов влияния учитывались их однозначность, управляемость, высокая точность и возможность варьирования в широком диапазоне. Каждый фактор варьировался на двух уровнях.

В качестве исследуемой продукции использовались морковь, картофель, свекла, кабачки, огурцы и баклажаны.

Удельные усилия резания растительных материалов определялись с помощью экспериментального лабораторного комплекса, принципиальная схема которого приведена на рис. 1.

Экспериментальный комплекс состоит из приводной части, узла резания и приборов для измерения, обработки и визуализации данных. Приводная часть включает в себя реверсивный электродвигатель, ременную и винтовую передачи. Узел резания представляет собой закрепленный на рамке пластинчатый нож, который перемещается в вертикальной плоскости. Ход ножа задается двумя концевыми выключателями, размещенными на раме установки. При достижении ножом крайнего нижнего положения, прикрепленный к корпусу рычаг воздействует на контакт нижнего концевой выключателя и электродвигатель отключается. Движение ножа вверх возобновляется после включения соответствующего переключателя на пульте управления (на рис. 1 не показан), закрепленном на раме экспериментальной установки. Верхний концевой выключатель ограничивает движение ножа вверх, тем самым обеспечивая безопасность работы с установкой.

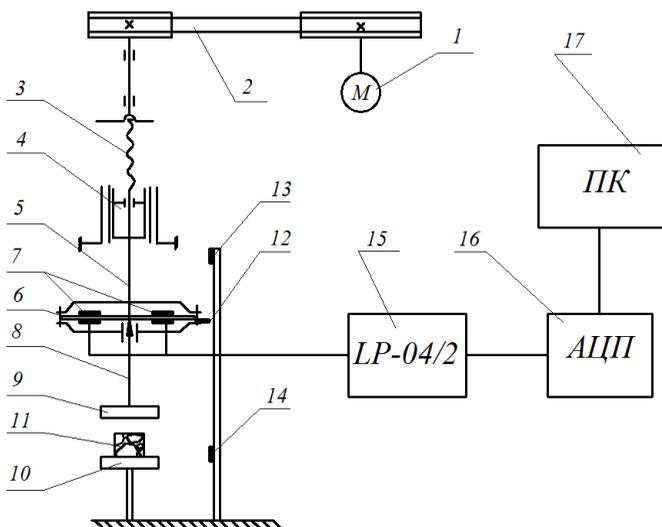


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального комплекса для исследования процесса резания пластинчатым ножом:

1 – электродвигатель, 2 – ременная передача, 3 – винтовая передача, 4 – стакан, 5 – вал, 6 – балка, 7 – тензодатчики, 8 – шток, 9 – нож, 10 – стол-опора, 11 – продукт, 12 – рычаг, 13, 14 – верхний и нижний концевые выключатели, 15 – усилитель, 16 – аналого-цифровой преобразователь, 17 – персональный компьютер

На вертикальном валу имеется корпус, на котором закреплена металлическая пластина с размещенными на ней тензорезисторами – тензобалка. В процессе воздействия режущей кромки ножа на продукт тензобалка изгибается штоком, что приводит к изменению сигнала, подаваемого чувствительными элементами. Считывание сигнала осуществляется при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП) Е 14-140. Для усиления сигнала, подаваемого тензорезисторами, используется усилитель LP-04/2. Предварительно усиленный сигнал подается на АЦП, после чего обрабатывается при помощи программного обеспечения LGraph и выводится на монитор персонального компьютера в виде осциллограмм исследуемого процесса.

На горизонтальном столе-опоре размещается образец исследуемого материала площадью поперечного сечения  $0,004 \text{ м}^2$  и высотой 15 мм. Необходимая скорость перемещения ножа обеспечивается подбором винтов винтовой передачи и шкивов ременной передачи, конструктивное исполнение которой позволяет свободно регулировать натяжение ремня. При движении ножа вниз происходит перерезание образца режущей кромкой до момента срабатывания нижнего концевого выключателя, после чего электродвигатель отключается и процесс резания прекращается. Таким образом, регулируя положение стола-опоры по высоте, можно задавать глубину реза либо выполнять полное перерезание исследуемого образца. В процессе перемещения лезвия ножа сквозь слой материала (продукта) производится запись показаний тензорезисторов, фиксирующих полное усилие резания.

Результаты исследований были получены в виде осциллограмм изучаемого процесса в режиме реального времени, после чего подвергались обработке и статистическому анализу.

По осциллограммам определялось общее усилие резания  $P_{\text{рез}}$ , прилагаемое к ножу.

Общее усилие резания может быть выражено через зависимость [2]:

$$P_{\text{рез}} = P_0 + P_{\text{сопр}}, \quad (1)$$

где  $P_0$  – сила сопротивления чистому резанию, Н;

$P_{\text{сопр}}$  – сумма вредных сопротивлений, Н.

Соответственно, удельное усилие резания  $q_{\text{уд}}$  является суммой удельного усилия чистого резания  $q_0$  и удельного усилия от вредных сопротивлений  $q_{\text{сопр}}$ :

$$q_{\text{уд}} = q_0 + q_{\text{сопр}}, \quad (2)$$

Экспериментальное удельное усилие резания определялось по формуле:

$$q_{\text{дiаг}} = \frac{P_{\text{дiаг}}}{L}, \quad (3)$$

где  $L$  – длина контакта продукта с лезвием ножа, равная ширине продукта, м.

Изменение угла резания осуществлялось подбором сменных режущих инструментов, входящих в комплект лабораторного комплекса. Диапазон вы-

бранных для исследования углов резания был получен на основании предварительного эксперимента, проведенного на указанной экспериментальной установке (рисунок 1). В ходе эксперимента определялись удельные усилия резания исследуемых растительных материалов при перерезании их ножами с различными углами расположения режущей кромки относительно поверхности резания. Результаты эксперимента приведены на рис. 2.

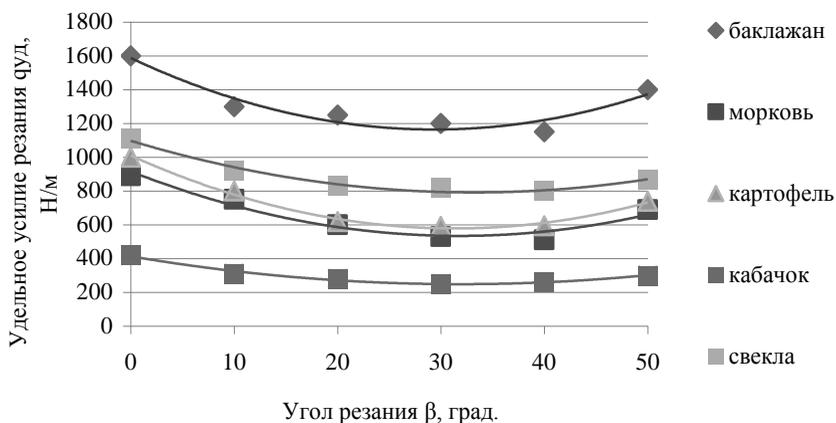


Рис. 2. Зависимость удельных усилий резания растительных материалов от угла резания

Установлено, что максимальные значения удельных усилий резания наблюдаются при рубящем резании, то есть при  $\beta \rightarrow 0$ . С увеличением угла резания происходит снижение удельных усилий резания в среднем в 1,5...2 раза до значения, обозначенного экстремумом функции, после чего удельные усилия резания возрастают. Оптимальные значения угла резания для исследуемой продукции находятся в интервале 25...40°, что соответствует минимальным усилиям резания.

Модуль упругости растительных материалов был определен экспериментально в диапазоне скоростей резания, используемых в овощерезательных машинах пищевой промышленности [5, 7]. Эксперимент проводился по стандартной методике путем одноосного сжатия исследуемого материала между двумя плоскопараллельными пластинами.

Для этого в лабораторном комплексе, приведенном на рисунке 1, узел резания заменялся узлом сжатия: вместо съемной рамы с режущим элементом, которая крепится на вертикальном валу посредством резьбового соединения, устанавливался металлический поршень с плоской горизонтальной поверхностью, являющийся подвижной пластиной. Тогда горизонтальная поверхность стола-опоры выполняет роль второй, параллель-

ной, пластины. На неподвижной пластине размещался образец исследуемого материала заданных геометрических размеров, после чего запускался электродвигатель и осуществлялось сжатие материала до установленной величины относительной деформации. Величина деформации образца задавалась путем регулирования стола-опоры по высоте относительно нижнего концевого выключателя. Тогда, при достижении подвижным поршнем-пластиной крайнего нижнего положения, определяющего степень сжатия материала, срабатывала автоматика и процесс сжатия прекращался. Измерительное оборудование фиксировало напряжение сжатия материала  $\sigma$ , что отображалось на мониторе компьютера в виде осциллограмм процесса. Экспериментальные данные анализировались и обрабатывались посредством программного обеспечения Statistica.

При анализе результатов эксперимента принималось допущение, что для вязко-упругих материалов, к которым относятся исследуемые продукты, при величине относительной деформации не более 20 % между напряжением сжатия и относительной деформацией материала существует линейная зависимость [1, 4, 5]:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\sigma}{\epsilon}, \quad (4)$$

где  $\epsilon$  – величина относительной деформации материала.

Экспериментально установлено [7], что в диапазоне скоростей сжатия от 0,4 м/с до 2,5 м/с, что соответствует скорости воздействия на материал режущей кромки ножа в овощерезательном оборудовании пищевой промышленности, модули упругости исследуемых растительных материалов изменяются в следующих диапазонах: картофеля – от 3,57 МПа до 3,37 МПа, моркови – от 2,9 МПа до 2,75 МПа, свеклы – от 4 МПа до 3,4 МПа, кабачков – от 1,72 МПа до 1,44 МПа, баклажан – от 1,5 МПа до 1,25 МПа, огурцов – от 1,32 МПа до 1,1 МПа.

Таким образом, для осуществления многофакторного исследования процесса резания растительных материалов пластинчатым ножом были установлены следующие уровни варьирования: скорость резания изменялась от 1,25 до 0,4 м/с, угол резания – от 10° до 40°, модуль упругости изменялся от 1 до 4 МПа.

Выбор указанного интервала варьирования скорости резания при проведении экспериментальных исследований обусловлен тем, что данный диапазон скоростей используется в работе овощерезательного оборудования пищевой промышленности, что подтверждается проведенными авторами исследованиями рынка продукции [6].

С учетом поставленных задач, выбранных факторов и интервалов их варьирования была построена матрица планирования экспериментального исследования процесса резания растительных материалов пластинчатым ножом в натуральных и кодированных единицах. В результате обработки

и анализа экспериментальных данных было получено уравнение регрессии в виде неполного уравнения второй степени, позволяющего оценить влияние на удельное усилие резания как самих факторов, так и их взаимодействий:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3, \quad (5)$$

где  $b_0 \dots b_6$  – коэффициенты регрессии.

В результате математической обработки экспериментальных данных с помощью метода наименьших квадратов найдены значения коэффициентов регрессии уравнения, которые приведены в таблице 1. Для оценки значимости полученных коэффициентов регрессии для каждого из них рассчитан критерий Стьюдента [3].

Таблица 1

Коэффициенты регрессии и оценка их значимости

	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
Значение	832,29	-39,00	-96,85	133,61	-6,67	-20,5	19,49
Критерий Стьюдента	293,82	13,77	34,19	47,17	2,36	7,24	6,88

Поскольку для всех коэффициентов регрессии значение критерия Стьюдента больше, чем критическое,  $t_{0,05}^{\text{крит}}(16) = 2,12$ , можно с вероятностью 95 % сделать вывод об их значимом влиянии на функцию отклика.

Анализ данных таблицы 1 показывает, что исследуемые факторы по отдельности оказывают большее влияние на удельные усилия резания, чем их взаимодействие. Из рассматриваемых факторов максимальное влияние оказывает модуль упругости продукта, минимальное – скорость резания. Из взаимодействий наиболее значимым является сочетание скорости резания и модуля упругости продукта.

Оценка адекватности полученного уравнения проводилась по критерию Фишера [3]. Получено значение критерия Фишера  $F = 2,80$ , которое меньше критического  $F_{0,05}^{\text{крит}}(1;16) = 4,49$ , что свидетельствует об адекватности полученного уравнения.

На рисунках 3 и 4 приведены графические изображения уравнения (5) с учетом таблицы 1 при фиксированных значениях двух из трех факторов.

Анализ рисунка 3 показывает, что увеличение скорости резания способствует снижению усилия резания. Динамика снижения определяется в значительной степени значениями двух других факторов. Так, при  $E = 1$  МПа и  $\beta = 10^\circ$  динамика снижения минимальная, при значениях  $E = 4$  МПа,  $\beta = 40^\circ$  – максимальная. То есть, для продуктов с низкими значениями модуля упругости  $E$  повышение скорости резания не всегда является эффективной

мерой по снижению усилия резания. Более эффективно, как показывает рисунок 2, использовать режущие устройства с большим углом резания.

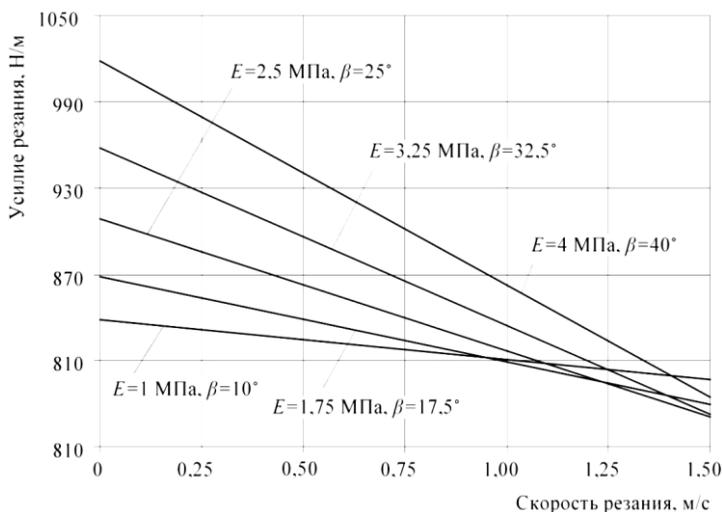


Рис. 3. Влияние скорости резания на усилие резания

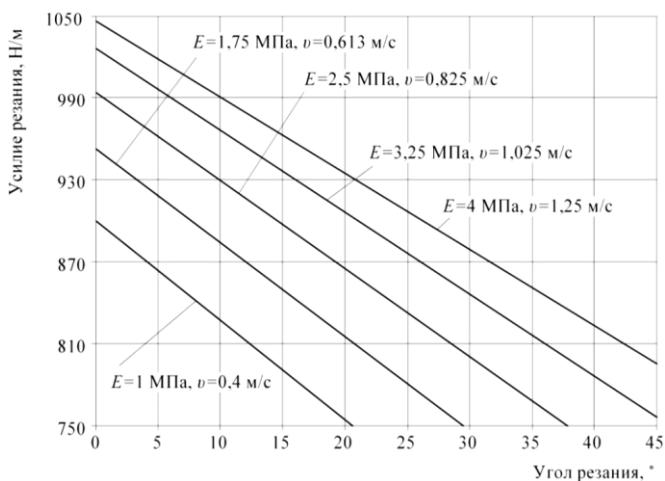


Рис. 4. Влияние угла резания на усилие резания

Анализ рисунка 4 показывает, что увеличение угла резания так же, как и скорость резания, способствует снижению удельных усилий. Однако влияние двух других факторов на динамику этой зависимости незначительно.

Анализируя полученное уравнение регрессии и результаты экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Наибольшее влияние на удельные усилия резания растительных материалов пластинчатым ножом оказывает модуль упругости продукта, характеризующий сопротивление разрезаемого материала внедрению пластинчатого ножа. При этом, на характере влияния модуля упругости скажется величина скорости резания: чем ниже показатель  $E$ , тем в меньшей степени проявляется влияние скорости резания и наоборот – чем в большей упругостью обладает структура продукта, тем эффективнее становится снижение удельных усилий резания за счет корректирования (увеличения) скорости процесса.

2. В диапазоне скоростей резания от 0,4 до 1,25 м/с влияние скорости внедрения ножа в продукт на удельные усилия резания минимально, по сравнению с другими факторами. Снижение удельных усилий резания будет эффективным при учете взаимовлияния скорости резания и модуля упругости обрабатываемого сырья. Такой подход является более рациональным при проектировании специализированного оборудования, предназначенного для переработки одного вида продукции (измельчение моркови для консервного производства, измельчение свеклы в сахарной промышленности, нарезка картофеля «фри» и т. д.) или нескольких, обладающих близкими по значению упругими свойствами.

3. Существенное влияние на удельные усилия резания оказывает сочетание факторов «модуль упругости – угол резания». При этом, чем более выражены упругие свойства продукта, тем предпочтительнее использовать более высокое значение угла резания. Так, для измельчения исследуемых корнеплодов (свекла, морковь, картофель) оптимальным будет являться угол резания от 30 до 50°, при резании продуктов с высоким содержанием влаги и меньшими значениями модуля упругости (кабачки, огурцы) – от 20 до 40°.

4. При измельчении продуктов, упругие свойства которых проявляются незначительно, увеличение скорости резания выше 0,5...0,75 м/с и угла резания выше 30° не является эффективной мерой влияния на удельные усилия резания и не способствует экономическому эффекту с учетом энергетических затрат, предшествующих выполнению этих условий.

5. При измельчении продуктов с большими значениями модуля упругости увеличение скорости резания и угла резания (в пределах оптимума) является экономически эффективной мерой.

Учитывая результаты проведенных исследований и приведенные рекомендации на стадии проектирования и в процессе эксплуатации овоще-

резательного оборудования, возможным является создание современного, эффективного и конкурентоспособного оборудования.

### Список литературы

1. *Резник, Н.Е.* Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н.Е. Резник. – М. : Машиностроение, 1975. – 311 с.
2. *Даурский, А.Н.* Резание пищевых материалов : Теория процесса, машины, интенсификация / А.Н. Даурский, Ю.А. Мачихин. – М. : Пищевая пром-сть, 1980. – 240 с.
3. *Адлер, Ю.П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 278 с.
4. *Rao, M.A.* Engineering Properties of Foods/ M. A. Rao, S. S. H. Rizvi. – Dekker, 1995. – 531 p.
5. *Заплетников, И.Н.* Исследование реологического поведения овощей в условиях одноосного сжатия / И.Н. Заплетников, А.В. Шеина // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции. – Минск : БГАТУ. – 2013. – 453 с.
6. *Заплетников, И.Н.* Оценка качества овощерезательного оборудования, представленного на рынке Украины / И.Н. Заплетников, А.В. Шеина // Вестник ХНТУСХ : темат. сб. науч. трудов. – № 119. – Харьков. – 2011. – 210 с.
7. *Заплетников, И.Н.* Зависимость реологических характеристик овощей от скорости резания в овощерезательных машинах / И.Н. Заплетников, А.В. Шеина. – Донецк : Вест. ДонНУЭТ, 2013. – С. 82-87.