УДК 360*363 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-100-104

Установка для исследования усилия бесстружечного резания упакованных отходов лесозаготовок криволинейными режущими кромками

В.Е. Родионов[1a], М.В. Дербин[1b], В.Н. Удальцов[2c], Д.А. Савенков[3d], В.С. Серёдкина[4e], И.В. Григорьев[4f]

[1]Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины 17, Архангельск, Россия
[2]ООО «Трактородеталь Групп», ул. Лермонтова 23, стр. 17, Архангельск, Россия
[3]ООО «Усть-Покшеньгский ЛПХ», ул. Лесная 14, пос. Ясный, Пинежский р-н, Архангельская область, Россия
[4]Якутская государственная сельскохозяйственная академия, ш. Сергеляхское 3, Якутск, Республика Саха Россия
[a]v.rodionov@narfu.ru, [b]m.v.derbin@narfu.ru, [c]v.udaltsov@narfu.ru, [d]savenkov_dm@mail.ru,
[e]viktoria.seryodkina@bk.ru, [f]silver73@inbox.ru
[a]https://orcid.org/0000-0003-4825-2517, [b]https://orcid.org/0000-0002-3219-0748,
[c]https://orcid.org/0000-0001-5363-7513, [d]https://orcid.org/0000-0003-4153-0502,
[e]https://orcid.org/0000-0001-7237-5803, [f] https://orcid.org/0000-0002-5574-1725
Статья поступила 2.04.2018, принята 28.04.2018

Отходы лесозаготовок все более активно используются для получении энергии. При сборе и упаковке ветвей и сучьев в удобные для транспортировки пакеты используют машины-пакетировщики, такие как Monra Forestal ENFO 2000 и John Deere 1490D. Для деления пакетов на определенную длину используют цепные пилы или ножи. По данным зарубежных исследований, ножи показывают большую эффективность и меньший расход на техническое обслуживание агрегата. На практике используется механизм гильотинного типа с двумя встречно движущимися полукруглыми ножами под действием гидравлического привода. Для увеличения эффективности работы агрегата возможно применение ножей с параболической режущей кромкой. По данным аналитических исследований, такой нож обладает меньшим усилием при резании (5–15 %) благодаря меньшим значениям длины ножа, участвующего в резании, и иной криволинейности режущей кромки. Наклон режущей кромки к вектору скорости резания приводит к снижению общего усилия резания. Для исследования процесса бесстружечного резания упакованных отходов лесозаготовок разработана установка, позволяющая определять силовые параметры процесса. К переменным факторам относятся форма режущей кромки, породный состав, коэффициент полнодревесности, средний диаметр ветвей в пакете. Силовые параметры резания будут фиксироваться с использованием оттарированного оборудования АЦП-ЦАП ZET 210 и дифференциального усилителя ZET 410. Измерительным элементом установки является специальная державка для одного подвижного ножа, представляющая из себя двухопорную балку с сосредоточенной нагрузкой от гидроцилиндра. Прогиб балки будет прямо пропорционален величине усилия резания.

Ключевые слова: пакетировщик; сбор отходов лесозаготовок; режущее устройство; бесстружечное резание древесины; криволинейные режущие кромки; экспериментальная установка; усилие резания.

Installation for studying the force of chipless cutting of packed logging waste with curved cutting edges

V.E. Rodionov[1a], M.V. Derbin[1b], V.N. Udalcov[2c], D.A. Savenkov[3d], V.S. Seredkina[4e] I.V. Grigorev[4f]

[1]Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; 17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, Russia
[2]"Traktorodetal Groups" Ltd; Building #17, 23, Lermontov St., Arkhangelsk, Russia
[3]"Ust-Pokshengsky LPH" Ltd, 14, Lesnaya St., Yasny Settlement, Pinezhskiy District, Arkhangelsk Oblast, Russia
[4]Yakutsk State Agricultural Academy; 3rd km, 3, Sergelyakhskoe Highway, Yakutsk, Russia
[a]v.rodionov@narfu.ru, [b]m.v.derbin@narfu.ru, [c]v.udaltsov@narfu.ru, [d]savenkov_dm@mail.ru,
[e]viktoria.seryodkina@bk.ru, [f]silver73@inbox.ru
[a]https://orcid.org/0000-0003-4825-2517, [b]https://orcid.org/0000-0002-3219-0748,
[c]https://orcid.org/0000-0001-5363-7513, [d]https://orcid.org/0000-0003-4153-0502,
[e]https://orcid.org/0000-0001-7237-5803, [f] https://orcid.org/0000-0002-5574-1725
Received 2.04.2018, accepted 28.04.2018

The usage of lumber stockpiling waste in energy production is a rapidly developing domain. Special convenient bunches and buncher-cars, such as Monra Forestal ENFO 2000 and John Deere 1490D are used for transportation of gathered and packed branch timber. To divide bunches into definite length, cross-cut saws and blades are used. According to foreign analysts, these blades show higher efficiency and lower costs on device maintenance support. On practice, tree shear apparatus with parallel-opposite blades under the hydraulic gear is employed. To improve work efficiency parabolic edge blades may also be used. After analytical results this type of

blades needs less cutting pressure (5-15%) due to shortened blade length and curve of the edge. Cutting edge inclination towards velocity vector causes reduction of cutting force. To study the process of unshielded cutting of packaged logging waste, an installation has been developed that makes it possible to determine the power parameters of the process. Variable factors include the shape of the cutting edge, rock composition, the coefficient of full-fledgedness, the average diameter of the branches in the package. Special tools will record force characteristics: analog-to-digital converter ZET 210 and differential amplifier ZET 410. Measuring element of the installation is a special moving blade holder. This holder is a simple beam with concentrated load from hydraulic cylinder. Beam deflection is directly proportional to the cutting force.

Keywords: waste bundler; waste timber collection; cutting device; chipless wood cutting; curved cutting edges; experimental setup; cutting force.

Введение

Повышение цен на ископаемые источники энергии и развитие биоэнергетики в РФ и за рубежом вызывают спрос на древесное топливо [1–7], одним из источников которого являются отходы лесозаготовок [2]. К ним относятся сучья, вершины, ветви, корни.

Для сбора и упаковывания отходов лесозаготовок в цилиндрические пакеты в европейских странах используют машины-пакетировщики. Проводятся исследования эффективности их работы [8–10]. Пакетировщики состоят из самоходной машины, имеющей манипулятор для подбора остатков (сучья, ветви, вершины) и пакетировочное устройство, размещенное на шасси машины. Существует целый ряд пакетировщиков, различных по конструкции и способу производства пакета (тюка) [8–10].

Некоторые пакетировщики после формирования пакета (сжатия и обвязки) выполняет его деление на необходимую длину. Существует два способа деления пакетов с отходами лесозаготовок.

1. Деление бесстружечным резанием установками гильотинного типа (Monra Forestal ENFO 2000).

2. Деление цепными пилами (John Deere 1490D).

Цепные пилы хорошо зарекомендовали себя при пилении стволовой древесины, обладая высокой скоростью прохода сквозь однородные слои. Однако исследования показали, что раскряжевка ножницами гильотинного типа является более эффективным и надежным способом, чем раскряжевка пилой. Так, у пакетировщика ENFO 2000 повторная резка пакета требовалась для одного из 50 пакетов, а у John Deere 1490D каждый второй пакет (тюк) требовал повторного прохода цепной пилы.

Пакетировщик Monra Forestal ENFO 2000 производит деление пакетов механизмом гильотинного типа с полукруглыми ножами под действием гидропривода.

Использование ножей для раскряжевки упакованных отходов лесозаготовок в сравнении с цепной пилой имеет следующие преимущества:

1. Меньшая удельная работа резания, меньшие энергозатраты на резание.

2. Меньшие затраты на техническое обслуживание режущего органа [11].

3. Более высокая устойчивость к износу.

4. Простота изготовления.

5. Время деления ножами меньше в среднем на 25–34 %.

6. Не требуются повторные проходы режущего органа.

Материалы и методы исследования. Для деления упакованных отходов лесозаготовок бесстружечный способ резания является наиболее подходящим. Такой способ, как описывалось ранее, уже используется в раскряжевочном устройстве пакетировщика Monra Forestal ENFO 2000 и др., в которых устанавливаются полукруглые ножи, но полукруглая форма не обеспечивает максимальной эффективности резания. Возможным способом повышения эффективности деления упакованных отходов может стать использование ножей с параболической режущей кромкой.

Разработанная установка позволит сравнить между собой два типа ножа, параболического и полукруглого, а также определить зависимость величины усилия бесстружечного резания криволинейными режущими кромками от различных факторов.

К основным факторам, которые будут влиять на усилие резания, относятся: форма криволинейной режущей кромки, профиль резца, угол заточки, способ резания, порода материала, диаметр пакета, коэффициент полнодревесности, температура, влажность, средний диаметр сучьев и др. [12].

Зависимость усилия резания от профиля резца, угла заточки, способа резания, влажности и температуры при бесстружечном резания древесины рассмотрены детально в работах [11–13].

Факторы, влияние которых необходимо выявить, называются переменными. Их можно разделить на две группы.

1. В качестве постоянных факторов принимаем:

– влажность древесины;

– температура древесины;

– скорость резания;

– направление резания — поперечное;

– радиус заострения лезвия ножей $\rho = 0{,}00002 - 0{,}00004$ м;

– шероховатость поверхности;

– материал ножей — сталь 30ХГСА, твердость 40–45 HRC;

– угол заточки ножей $\frac{\pi}{6}$;

– толщина ножей 5 мм.

2. Переменные факторы:

– форма режущей кромки — полукруглая (I-форма), параболическая (II-форма);

– коэффициент полнодревесности — 0,2; 0,4; 0,6;

– породный состав — ель, сосна, осина;

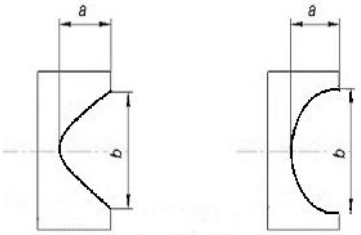
– средний диаметр сучьев в пакете.

Скорость резания не влияет на величину усилия резания, если находится в пределах до 0,41 м/с [11].

Угол заточки был принят равным 30^{o}, исходя из результатов исследований, полученных в работе [12], так

как является наиболее оптимальным для бесстружеч-

С целью обеспечения объективной разницы в усилиях резания для двух типов ножей необходимо, чтобы они имели одинаковые геометрические параметры резания (рис. 1).

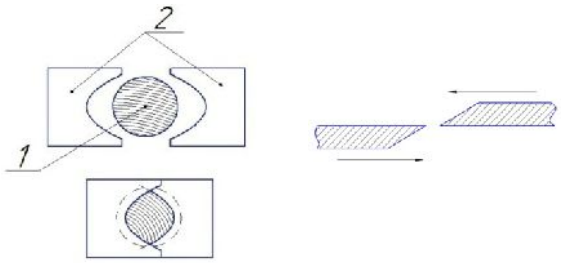


а *б*

Рис. 1. Геометрические параметры исследуемых ножей: *а* — параболическая режущая кромка; *б* — полукруглая режущая кромка

Величина заглубления лезвия параболического ножа a_1 должна равняться величине заглубления полукруглого ножа a_2. Аналогично и для ширины захвата, где $b_1 = b_2$.

На рис. 2 приведена схема деления упакованных в цилиндр отходов лесозаготовок.



а *б*

Рис. 2. Схема резания упакованных отходов лесозаготовок: *а* — расположение ножей и пучка древесины (*1* — пакет; *2* — ножи); *б* — схема расположения профилей ножей при движении во время резания

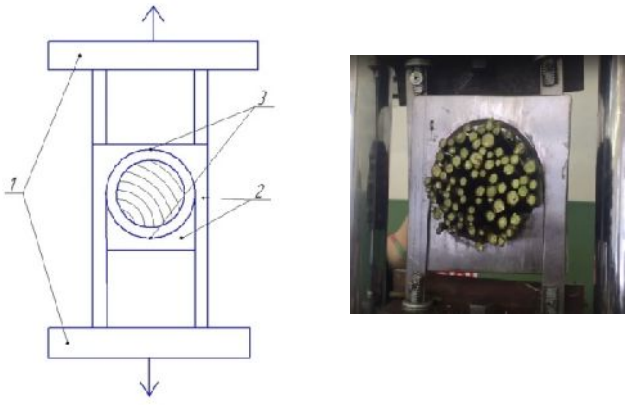
При статистической обработке экспериментальных данных предполагается нормальное распределение случайных величин. Перед проведением основных опытов было проведены разведывательные опыты с выборкой, включающие 51 наблюдение. Проверка гипотезы нормального распределения может быть выполнена по критерию Пирсона X^2.

Перерезание связанных в пакет сучьев осуществлялось двумя ножами, закрепленными на разрывной машине. Схема перерезания приведена на рис. 3*а*. Разведывательные опыты проводились на разрывной машине УИМ-12 (рис. 3*б*).

Диаметр перерезаемого пакета был равен приблизительно 100 мм. Пакеты состояли из сучьев ивы со средним диаметром от 6 до 9 мм. Угол заточки режущей кромки был принят 30^o.

Была проведена серия из 51 реза связки полуокружной формой ножа, при этом значение усилия резания находилось в интервале от 510 до 540 кг. Поле рассеивания составляет 30 кг ($y_{\max} - y_{\min}$). Поле рассеивания было разбито на три равных интервала, в каждом интервале находилось в среднем от 15 до 20 наблюдений. Необходимое число наблюдений при показателе достоверности 2,58 и доверительной вероятности 0,99 составляет $n \approx 7$.

ного резания древесины.



а *б*

Рис. 3. Разведывательные испытания на разрывной машине УИМ-12: *а* — схема испытания при разведывательных опытах (*1* — держатели ножей; *2* — ножи; *3* — режущие кромки); *б* — общий вид установки

Современные пакетировщики с бесстружечным резанием отходов лесозаготовок оснащены гидравлическим приводом, поэтому для проведения основных экспериментов был принят стенд с силовым гидроцилиндром.

Стенд представляет собой сварную прямоугольную раму длиной 1 100 мм и высотой 400 мм (рис. 4). С одного конца размещен неподвижный нож, с противоположной стороны — подвижный нож, который осуществляет движение за счет работы гидроцилиндра двойного действия.

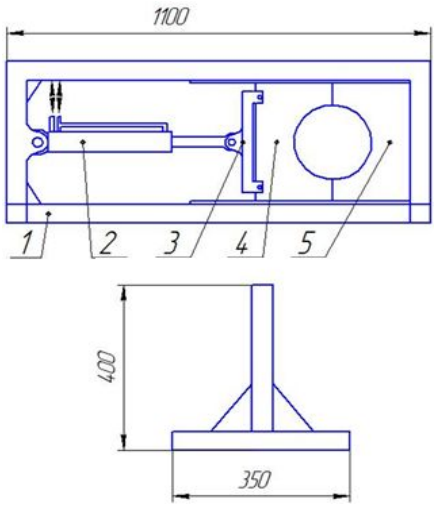


Рис. 4. Схема измерительного стенда: *1* — рама; *2* — гидроцилиндр; *3* — измерительная державка; *4* — подвижный нож; *5* — неподвижный нож

Для подачи гидравлической жидкости в полости гидроцилиндра установлен насос типа НШ-10У с электрическим приводом мощностью 2,8 кВт и частотой вращения 2 400 об/мин. В состав измерительной аппаратуры входят измерительные преобразователи, тензодатчики, усилитель, персональный компьютер. Изме-

рительный тензодатчик наклеивается на срединную часть измерительной державки.

Измерительная державка работает по принципу балки, жестко закрепленной в двух концах, где и реакции опоры. Прогиб державки пропорционален силе резания. Величина прогиба фиксируется с использованием оборудования АЦП-ЦАП ZET 210 и дифференциального усилителя ZET 410. Предварительно произведена тарировка тензометрических датчиков.

Программа исследований (см. таблицу 1) состоит из четырех серий экспериментов, которые позволят установить зависимости удельных силовых показателей резания от формы режущей кромки, коэффициента полнодревесности, породного состава и среднего диаметра сучьев в пакете.

Таблица 1

Программно-методическая сетка однофакторного эксперимента

Наименование фактора	Обозначение	Числовые значения факторов											
		I серия эксп.		II серия эксп.			III серия эксп.			IV Серия эксп.			
Форма режущей кромки	I, II	I	II	Const = II									
Коэффициент полнодревесности	$K_{пд}$	Const = 0,4		0,2	0,4	0,6	Const = 0,4						
Породный состав	–	Const = E					E	C	Oc				
Средний диаметр	$d_{ср}$, *м*	Const = 0,03								0,03	0,05	0,07	0,09

Исследуемые зависимости:

– P_{max}, Н — максимальное усилие резания;

– $P_{ср}$, Н — среднее усилие резания;

– A, Н — работа резания.

Результаты исследования. На величину усилия бесстружечного резания древесины прямо пропорционально влияет длина ножа, участвующая в резании. Из теоретического исследования известно [11], что максимальная длина в резании у параболического ножа будет меньше, чем у полукруглого, на 6 %, поэтому предполагается, что максимальное усилие резания будет также снижено.

Помимо длины ножа на усилие резания будет также влиять его криволинейность. Наклон ножа к вектору скорости резания приводит к снижению общего усилия резания по закону [11; 12]:

$$P = P_к \sin \lambda + P_п, \qquad (1)$$

где λ — угол наклона режущей кромки к вектору скорости резания (рис. 5); $P_к$ — усилия внедрения клиновидной части ножа; $P_п$ — усилие преодоления трения боковых граней ножа.

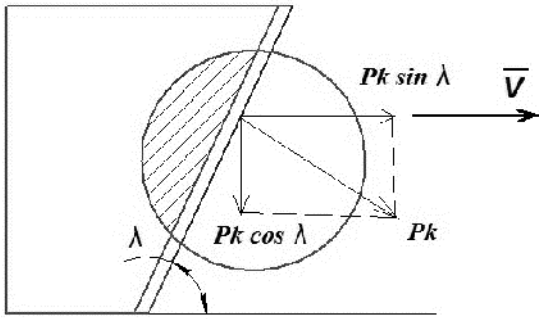


Рис. 5. Зависимость усилия резания лесоматериала прямолезвийным ножом под углом λ к вектору скорости резания

Упакованные отходы лесозаготовок — материал неоднородный, поэтому давление на боковые грани ножа будет существенно мало, и вследствие этого на общее усилие резания будет существенно влиять криволинейность ножа, исходя из формулы (1).

Выводы

1. Использование бесстружечного способа для деления упакованных отходов лесозаготовок является наиболее оптимальным.

2. Формой режущей кромки для большей эффективности резания может стать параболическая форма.

3. Для наиболее объективного сравнения параметров резания для полукруглой и параболической режущих кромок приняты равные значения величины заглубления *a* и ширины захвата *b* для обоих типов ножей.

4. Переменными факторами являются:

– форма режущей кромки: полукруглая (I форма), параболическая (II форма);

– коэффициент полнодревесности;

– породный состав: ель, сосна, осина;

– средний диаметр сучьев в пакете.

5. Параболическая режущая кромка за счет меньшей длины ножа, участвующего в резании, и иной криволинейности режущей кромки должна показывать снижение усилия резания.

6. Разведывательные опыты показывают, что необходимое число наблюдений для исследования имеет значение $n \approx 7$.

Литература

1. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Куницкая О.А. Переработка древесины на лесосеке: перспективы развития // Энергия: экономика, техника, экология. 2017. № 2. С. 27-33.

2. Григорьев И.В., Тихонов И.И., Локштанов Б.М., Куницкая О.А. Системы машин для заготовки и переработки низкотоварной древесины на топливную щепу в условиях лесосеки // Инновации в промышленности и социальной сфе-

ре: сб. материалов республиканской научно-практической конференции. Петрозаводск: ПетрГУ, 2015. С. 30-33.

3. Куницкая О.А., Григорьев И.В. Переработка низкотоварной древесины: проблемы и перспективы // Энергия: экономика, техника, экология. 2015. № 9. С. 70-75.

4. Григорьев И.В., Тихонов И.И., Куницкая О.А., Никифорова А.И., Григорьева О.И. Создание топливной щепы // Дерево.ru. 2014. № 6. 68 с.

5. Григорьева О.И. Новая машина для проведения рубок ухода за лесом // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-2 (13-2). С. 116-119.

6. Григорьева О.И. Новая машина для очистки лесосек // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 5-3 (10-3). С. 96-99.

7. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И., Куницкая О.А. Обоснование методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестн. Крас. гос. аг. ун-та. 2012. № 6. С. 72-77.

8. Леонов Е.А., Федоренчик А.С. Состояние и проблемы утилизации низкокачественной древесины в энергетических целях в Беларуси //Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы междунар. науч.-технической конф. Минск, 2014. С. 49-51.

9. Матросов А.В., Быковский М.А. Современные машины и оборудования для пакетирования лесосечных отходов и тонкомерной древесины // Лестной вестник. 2014. № 2. С. 56-61.

10. Григорьев И.В., Газизов А.М., Григорьева О.И. Новые технологические процессы лесосечных работ // Вестн. Башкир. гос. аг. ун-та. 2016. № 2 (38). С. 97-102.

11. Овчинников В.В. Оборудование бесстружечной разделки лесоматериалов. М.: Лесная пром-сть, 1990. С. 224.

12. Родионов В.Е., Дербин В.М., Дербин М.В., Удальцов В.Н. Силовой расчет ножей с криволинейными режущими кромками для резания древесины // Системы Методы Технологии. 2017. № 2 (34). С. 121-128.

13. Захаров В.В. Импульсное резание древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 160 с.

References

1. Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Kunickaya O.A. Wood processing in the cutting area: prospects of development //Energy: economics, engineering, ecology. 2017. № 2. P. 27-33.

2. Grigorev I.V., Tihonov I.I., Lokshtanov B.M., Kunickaya O.A. System of machines for harvesting and processing low-grade wood chip fuel in terms of wood-cutting area // Innovacii v promyshlennosti i socialnoj sfere: sb. materialov respublikanskoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Petrozavodsk: PetrGU, 2015. P. 30-33.

3. Kunickaya O.A., Grigorev I.V.Processing of low-grade wood: problems and prospects // Energy: economics, engineering, ecology. 2015. № 9. P. 70-75.

4. Grigorev I.V., Tihonov I.I., Kunickaya O.A., Nikiforova A.I., Grigoreva O.I. Creating fuel chips // Derevo.ru. 2014. № 6. 68 p.

5. Grigoreva O.I. New machine for felling forest care // Aktualnye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika. 2015. T. 3, № 2-2 (13-2). P. 116-119.

6. Grigoreva O.I. New machine for cleaning of cutting areas // Aktualnye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika. 2014. T. 2, № 5-3 (10-3). P. 96-99.

7. Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Nikiforova A.I., Kunickaya O.A. Rationale for methods of assessment of environmental efficiency of forest management //The Bulletin of KrasGAU. 2012. № 6. P. 72-77.

8. Leonov E.A., Fedorenchik A.S. State and the problem of disposing of low-quality wood for energy purposes in Belarus // Aktualnye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy mezhdunar. nauch.-tehneskoj konf. Minsk, 2014. P. 49-51.

9. Matrosov A.V., Bykovskij M.A. Modern machines and equipment for baling logging residues and small-diameter wood //Forestry Bulletin. 2014. № 2. P. 56-61.

10. Grigorev I.V., Gazizov A.M., Grigoreva O.I. New technological process of logging operations // Vestnik Bashkir State Agrarian University. 2016. № 2 (38). P. 97-102.

11. Ovchinnikov V.V. Equipment of chipless cutting of timber. M.: Lesnaya prom-st, 1990. 224 p.

12. Rodionov V.E., Derbin V.M., Derbin M.V., Udalcov V.N. Power calculation of knives with curved cutting edges for cutting wood // Systems Methods Technologies. 2017. № 2 (34). P. 121-128.

13. Zaharov V.V.Impulse cutting of wood. M.: Lesn. prom-st, 1983. 160 p.