ISSN 1998-1643

Министерство образования и науки
Российской Федерации

Научный журнал

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ
ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

(продолжение журнала 1947–1975 гг.)

№ 8 (129). Т. 2. Декабрь, 2012

Серия: Естественные и технические науки

Адрес редакции журнала
185910, Республика Карелия,
г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 272.
Тел. (8142) 76-97-11
E-mail: uchzap@mail.ru

uchzap.petrsu.ru

ISSN 1998-1643

Ministry of Education and Science
of the Russian Federation

Scientific Journal

PROCEEDINGS
OF PETROZAVODSK STATE UNIVERSITY

(following up 1947–1975)

№ 8 (129). Vol. 2. December, 2012

Natural & Engineering Sciences

The Editor's Office Address
185910, Lenin Avenue, 33. Tel. +7 (8142) 769711
Petrozavodsk, Republic of Karelia
E-mail: uchzap@mail.ru

uchzap.petrsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЯ

Кищенко И. Т., Потапова М. Н.
Сезонный рост побегов представителей рода *Betula* (*Betulaceae*) в условиях интродукции . . 7

Рыжков Л. П.
Fish industry in Karelian Republic (Russia) 11

Дзюбук И. М.
Рыбная часть сообщества гидробионтов в районе садкового форелевого хозяйства 14

Заводовский П. Г.
Первые данные об афиллофороидных грибах в лесных экосистемах Шотозерья 18

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

Зарипова Ю. Р., Мейгал А. Ю.
Клиническая и электромиографическая характеристики нейромышечного статуса у недоношенных детей 20

Мелентьева А. А., Барышева О. Ю., Хейфец Л. М., Зуев А. В., Стратегопуло В. А.
Минерально-костные нарушения при хронической болезни почек 25

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

Евстратова Л. П., Николаева Е. В., Богословский С. А.
Влияние биомассы люпина узколистного на урожайность картофеля в природных очагах *Globodera rostochiensis* Woll 30

Штеркель С. Г., Болгов А. Е.
Эффективность производственно-селекционной и экономической деятельности племенных заводов айрширского скота в Карелии 32

Царёв А. П., Лаур Н. В., Царёв В. А.
Экономическая эффективность лесной селекции 35

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Малинов Г. И., Кондрашов В. Ф., Гаврилов Т. А.
Определение углов скольжения лезвия в процессе опорного резания 40

Савин И. К., Заваркина Е. А.
Развитие комплекса охлаждения с использованием естественного холода с циклом ЭГД-ИКС 43

Родионов А. В., Цыпук А. М., Марков О. Б., Эгипти А. Э.
Направления совершенствования динамического лункообразователя 46

Суханов Ю. В., Селиверстов А. А., Соколов А. П., Сюнёв В. С.
Имитационное моделирование работы харвестера: алгоритмы и реализация 49

Шабаев А. И., Кузнецов В. А., Спиричев М. В., Косицын Д. П.
Подходы к разработке комплекса алгоритмов и программ оптимального планирования и управления сквозными процессами использования древесины 52

Бабкин В. А.
Температурная зависимость коэффициентов модели анизотропной пристеночной турбулентности для воды и воздуха 57

Беляев С. В., Давыдков Г. А., Перский С. Н.
Биотоплива второго поколения: европейский опыт 61

Девятникова Л. А., Емельянова Е. Г.
Пути повышения эффективности использования древесного сырья на целлюлозно-бумажных комбинатах 65

Никонова Ю. В., Раковская М. И., Рой К. Д.
Поперечная жесткость круглых лесоматериалов: эксперименты и численное моделирование 69

Селютина Л. Ф.
Энергоэффективные конструкции в домостроении Республики Карелия 73

Фотина Е. В., Марахтанов А. Г., Насадкина О. Ю.
Информационное обеспечение повышения показателей индексов научного цитирования ученых ПетрГУ 77

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Игнахин В. С., Сысун В. И., Тихомиров А. А.
Зондовые измерения в разреженной плазме 82

Когочев А. Ю., Курсков С. Ю., Сысун В. И.
Excitation processes in Ar-Ar collisions 86

Сидоров Н. В., Феклистова Е. П., Алешина Л. А., Воскресенский В. М.
Кластеризация структурных единиц катионной подрешетки ниобата лития 90

Гостев В. А., Михайлов Е. В.
Плазменное нанесение углеродсодержащих покрытий 94

Штыков А. С., Луизова Л. А.
Evaluating of diffusion constant as kinetic parameter of dusty plasma structures 97

Пешкова И. В., Санталова Д. Р.
On application of weak regeneration in simulation of complex inventory control systems 100

Бездельников В. А.
Elastic deformation modeling based on surface grid. 104

Валова А. М.
Search of linear recurrence correlation with constant integer coefficients in pre-set sequence by means of eucludean algorighm. 106

Воропаев А. Н.
Вывод формул для количества циклов фиксированной длины в графах ладьи 109

Караваев А. М.
Number of physical connectivity states in transfer matrix method for enumeration of Hamiltonian circuits in rectangular lattice 112

Информация для авторов. 114

Contents 117

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) с 2008 года

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ РАН

Сведения о журнале публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Требования к оформлению статей см.:
http://uchzap.petrsu.ru/files/reg.pdf

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

Редактор С. Л. Смирнова. Корректор Г. А. Мехралиева. Переводчик Н. К. Дмитриева. Верстка А. В. Мацко.

Подписано в печать 28.12.2012. Формат 60x90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (2-й завод – 175 экз.) Изд. № 371.

Индекс 66093. Цена свободная.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77–37987
от 2 ноября 2009 г. выд. Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.

Отпечатано в типографии Издательства
Петрозаводского государственного университета
185910, Республика Карелия,
г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Декабрь, № 8. Т. 2 **Биология** **2012**

УДК 582.475.2:581.522.68

ИВАН ТАРАСОВИЧ КИЩЕНКО
доктор биологических наук, профессор кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ivanki@karelia.ru

МАРИНА НИКОЛАЕВНА ПОТАПОВА
агроном Ботанического сада эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
potap@sampo.ru

СЕЗОННЫЙ РОСТ ПОБЕГОВ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА *BETULA* (*BETULACEAE*) В УСЛОВИЯХ ИНТРОДУКЦИИ*

Исследования проводились в подзоне средней тайги (Южная Карелия). Объектами исследований служили представители 6 видов и 1 формы рода *Betula*. Установлено, что особенности роста побегов и листьев обусловлены биологическими свойствами вида.

Ключевые слова: виды березы, рост, побеги, интродукция

Усиливающееся загрязнение окружающей среды требует увеличения объема озеленительных работ. Многие виды лиственных древесных растений, в том числе и рода *Betula* (из других географических районов) устойчивы к загазованности и задымлению воздуха. По данным К. К. Калуцкого и Н. А. Болотова [1], хорошо подобранные к новым экологическим условиям виды древесных растений при введении в культуру часто значительно перегоняют по продуктивности местные виды. В связи с этим предполагается их интродукция и ее оценка. Один из важнейших показателей интродукции – степень соответствия ритма роста и развития растения динамике экологических факторов [3]. Именно сезонный ритм роста является интегральным показателем, характеризующим адаптацию растений к условиям среды и соответствие последних биологии вида [4], [9].

В отечественной литературе выяснению особенностей сезонного роста вегетативных органов лиственных древесных растений уделено сравнительно мало внимания [2], [5], [11]. Цель нашей работы – изучение в этом аспекте интродуцентов рода *Betula* в таежной зоне России.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Исследования проводили в 2001–2002 годах в Ботаническом саду Петрозаводского университета, расположенном на берегу Онежского озера (подзона средней тайги). Объектами исследований служили 6 видов и 1 форма рода *Betula*: береза пушистая *B. pubescens* Ehrh., береза повислая *B. pendula* Roth, карельская береза *B. pendula* Roht. var. *carelica* (Merckl.) Hamet-Ahti, береза желтая *B. lutea* Michx., береза маньчжурская *B. mandshurica* Rgl., береза плосколистная *B. platyphylla* Sukacz., береза вязолистная *B. ulmifolia* Siebold et Zucc. (табл. 1).

С целью изучения роста ауксибластов с помощью линейки измеряли длину стеблей второго порядка ветвления с южной части кроны на высоте 1–1,5 м с момента набухания почек до заложения зимующих почек (через каждые 2–3 дня). Объем выборки для каждого вида за каждый срок наблюдения составлял 25 побегов.

Таблица 1

Характеристика объектов исследования

Виды и формы растений	Место происхождения саженцев, город	Возраст, лет
Betula pubescens	Петрозаводск	51
B. pendula	Петрозаводск	42
B. pendula var. carelica	Петрозаводск	18
B. lutea	Архангельск	18
B. mandshurica	Санкт-Петербург	44
B. platyphylla	Санкт-Петербург	44
B. ulmifolia	Санкт-Петербург	44

Примечание. Латинские названия даны по [8].

Формирование листьев на ауксибластах изучали с момента распускания вегетативных почек до полного прекращения их роста через каждые 2–3 дня. Наблюдения проводили путем обвода контуров листовых пластинок карандашом на белой бумаге, затем с помощью планиметра определяли их площадь. Объем выборки для каждого вида за каждый срок наблюдения составлял 25 листьев. Величину суточного прироста определяли как разницу в длине или площади изучаемых органов между последующим и предшествующим наблюдениями, деленную на число суток этого периода [6], [7].

Климатические данные были получены от Сулажгорской метеостанции (Карельская гидрометобсерватория), расположенной в 3 км юго-западнее Ботанического сада. Все выборки проверены на закон нормального распределения. Коэффициенты корреляции и различия между средними величинами оценены на достоверность. Из полученных элементарных статистик, в частности, следует, что показатель точности опыта довольно высок (4–6 %), а коэффициент вариации невелик (14–18 %).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования позволили установить, что сроки начала роста побегов изучаемых видов Betula могут варьировать по годам в пределах одной-двух недель и приходятся на середину-конец мая. При этом различия между видами не превышают одной недели (табл. 2). Изменчивость подобного рода отмечал и Н. В. Шкутко [10].

Формирование побегов в длину у изучаемых растений заканчивается в середине июля. Сроки прекращения этого процесса у разных видов различаются не более чем на 3 суток. При этом различия по годам не превышают недели. Таким образом, у всех изучаемых видов *Betula* наблюдается весьма слабая вариабельность сроков наступления фенофаз, характеризующих рост побегов. По мнению Н. В. Шкутко [10], степень адаптации интродуцентов к новым климатическим условиям тем выше, чем менее изменчивы сроки начала и окончания их фенофаз.

Различия в сроках начала и окончания роста побегов тех или иных видов растений соответственно отражаются на продолжительности формирования этих органов. В зависимости от вида растения и года наблюдений она варьирует от 43 до 70 суток (табл. 3). Время кульминации прироста побегов *Betula* весьма существенно изменяется по годам. Раньше всех эта фаза наступает у *B. pendula* var. *carelica* и *B. lutea* (20.06–07.07), позднее всех – у *B. platyphylla* и *B. ulmifolia* (24.06–11.07). Таким образом, различия между видами по этому показателю не превышают одной недели. Величина максимального суточного прироста побегов у изучаемых видов *Betula* значительно различается, наибольшая (3,5 мм/сут.) обнаружена у *B. platyphylla* и *B. pubescens.* У остальных изучаемых видов этот показатель меньше в 2–4 раза. Подчеркнем, что погодичная изменчивость величины максимального прироста у побегов может достигать 50–700 % (табл. 3).

Таблица 2

Температурный режим воздуха в период роста побегов разных видов *Betula*

Виды и формы растений	Год наблюдения	Начало роста			Кульминация прироста			Окончание роста		
		Дата	Среднесут. температура воздуха, °С	Сумма положит. температур, °С	Дата	Среднесут. температура воздуха, °С	Сумма положит. температур, °С	Дата	Среднесут. температура воздуха, °С	Сумма положит. температур, °С
Betula pubescens	2001	7.07	+5,7	190	25.06–03.07	+16,7	873	16.07	+23,8	1103
	2002	28.05	+7,5	239	28.05–01.06	+15,1	301	10.07	+21,1	928
B. pendula	2001	14.05	+6,5	233	29.06–07.07	+19,9	951	19.07	+23,6	1194
	2002	26.05	+5,8	225	28.05–01.06	+15,1	301	10.07	+21,1	928
B. pendula var. carelica	2001	14.05	+6,5	233	29.06–03.07	+20,2	789	19.07	+23,6	1194
	2002	26.05	+5,8	225	20–24.06	+13,4	756	18.07	+16,6	1081
B. lutea	2001	14.05	+6,5	233	29.06–07.07	+19,9	951	19.07	+23,6	1194
	2002	26.05	+5,8	225	20–24.06	+13,4	756	18.07	+16,6	1081
B. mandshurica	2001	14.05	+6,5	233	25–29.06	+13,7	720	16.07	+23,8	1103
	2002	26.05	+5,8	225	24–28.06	+14,9	711	18.07	+16,6	1081
B. platyphylla	2001	14.05	+6,5	233	07–11.07	+18,6	933	19.07	+23,6	1194
	2002	26.05	+5,8	225	16–20.06	+19,6	600	18.07	+16,6	1081
B. ulmifolia	2001	14.05	+6,5	233	07–11.07	+18,6	933	19.07	+23,6	1194
	2002	26.05	+5,8	225	24–28.06	+14,9	711	14.07	+18,5	1015

Обнаруженная изменчивость в продолжительности и интенсивности роста побегов обусловливает и соответствующее различие в величине их годичного прироста. При этом погодичная вариабельность длины побегов у всех изучаемых видов *Betula* достигает 30–150 %. В 2001 году самые длинные побеги (457 мм) сформировались у *B. ulmifolia* (табл. 3). На следующий год самые короткие побеги были характерны для этого вида и для *B. pendula* (123–108 мм). Вероятно, сочетание погодных условий конкретного года специфически сказывается на интенсивности деятельности апикальных меристем того или иного вида.

Анализ результатов свидетельствует о том, что величина годичного прироста побегов обусловлена соответствующими различиями в интенсивности роста, а не в его продолжительности. Так, длина стебля в 2001 году у *B. platyphylla* оказалась в 2 раза больше, чем у *B. pendula*, а продолжительность роста у них была одинаковой.

Физиологические реакции растений, в том числе и ростовые, определяются состоянием среды и диапазоном толерантности вида к экологическим факторам (закон Шелфорда). Следовательно, установив значение факторов среды в ключевые периоды роста, а также форму и силу связи между динамикой прироста и изменчивостью этих факторов, можно судить о степени их соответствия требованиям организма. Результаты исследований показали, что рост побегов у изучаемых видов *Betula* может начаться при повышении среднесуточной температуры воздуха до +5,8…+7,5 °С (табл. 2). Кроме того, начало этой фенофазы зависит и от температуры воздуха предшествующего периода. К этому времени сумма положительных температур достигает 190…233 °С. Во время прекращения роста побегов среднесуточная температура воздуха и сумма положительных температур варьируют в довольно широких пределах: +16,6…+23,8 и 928…1194 °С соответственно. Данные свидетельствуют о том, что сроки прекращения этой фенофазы у видов *Betula* обусловлены генотипом вида.

Требовательность растения к температуре воздуха в период максимального прироста побегов у различных видов *Betula* почти не различается. Кульминация прироста побегов может наступить уже при повышении среднесуточной температуры воздуха до +13 °С. Сумма положительных температур в этот период варьирует в широких пределах (301–951 °С), что указывает на отсутствие заметного влияния данного параметра на интенсивность прироста побегов. Сроки начала роста листьев (фенофаза «обособление листьев на побегах») изучаемых видов *Betula* могут варьировать в пределах 4–8 суток (табл. 4). Наступление этой фенофазы за годы исследований наблюдалось со 2 по 16 мая. Погодичная изменчивость в сроках начала роста листьев достигает 14 суток.

Формирование листьев прекращается 28.06–16.07, причем у *B. pubescens* и *B. pendula* на несколько суток раньше, чем у других видов. Различия в продолжительности формирования листьев у видов *Betula* достигают 6–20 суток. В зависимости от года исследования величина данного показателя может различаться на 3–28 суток, составляя от 43 до 75 суток (табл. 5).

Таблица 3

Основные характеристики линейного прироста побегов у представителей видов *Betula*

Виды и формы растений	Год наблюдения	Максимальный суточный прирост, мм/сут.	Годичный прирост, мм	Продолжительность роста, сут.
Betula pubescens	2001	0,45 ± 0,02	262 ± 13	70
	2002	3,50 ± 0,15	202 ± 9	43
B. pendula	2001	0,57 ± 0,02	256 ± 12	66
	2002	1,25 ± 0,06	108 ± 4	45
B. pendula var. carelica	2001	0,44 ± 0,02	221 ± 11	66
	2002	2,75 ± 0,12	215 ± 8	53
B. lutea	2001	0,72 ± 0,03	321 ± 15	66
	2002	2,75 ± 0,02	146 ± 7	53
B. mandshurica	2001	2,25 ± 0,14	218 ± 9	63
	2002	0,77 ± 0,03	445 ± 19	53
B. platyphylla	2001	0,77 ± 0,03	445 ± 21	66
	2002	3,50 ± 0,17	288 ± 14	53
B. ulmifolia	2001	1,22 ± 0,05	457 ± 23	66
	2002	1,50 ± 0,07	123 ± 6	49

Установлено, что сроки интенсивного прироста листьев испытывают сильную погодичную изменчивость и слабо связаны с видовыми особенностями. Эта фенофаза у изучаемых видов *Betula* может наступать в любое время июня.

Величина максимального прироста листьев у разных видов *Betula* существенно различается. Его наибольшее значение (в 2002 году 100 мм^2/сут.) обнаружено у *B. pendula*, за годы исследований различалась в 1,5–2 раза (табл. 5).

Таблица 4

Температурный режим воздуха в период роста листьев разных видов *Betula*

Виды и формы растений	Год наблюдения	Начало роста			Кульминация прироста			Окончание роста		
		Дата	Среднесут. температура воздуха, °С	Сумма положит. температур, °С	Дата	Среднесут. температура воздуха, °С	Сумма положит. температур, °С	Дата	Среднесут. температура воздуха, °С	Сумма положит. температур, °С
Betula pubescens	2001	02.05	10,7	182	12–16.06	12,4	598	16.07	23,0	1126
	2002	16.05	16,5	179	25.06–03.07	19,0	952	10.07	21,1	928
B. pendula	2001	02.05	10,7	182	12–16.06	12,4	598	16.07	23,0	1126
	2002	16.05	16,5	179	28.05–01.06	20,2	301	02.07	15,0	771
B. pendula var. carelica	2001	02.05	10,7	182	16–20.06	14,8	655	16.07	23,0	1126
	2002	16.05	16,5	179	28.05–01.06	20,2	301	14.07	18,5	1015
B. lutea	2001	08.05	10,2	115	12–16.06	12,4	598	16.07	23,0	1126
	2002	08.05	13,0	94	28.05–01.06	20,2	301	14.07	18,5	1015
B. mandshurica	2001	02.05	10,7	182	12–16.06	12,4	598	16.07	23,0	1126
	2002	16.05	16,5	179	25.06–03.07	19,0	952	28.07	14,9	711
B. platyphylla	2001	08.05	10,2	115	16–20.06	14,8	655	16.07	23,0	1126
	2002	08.05	13,0	94	28.05–01.06	20,2	301	10.07	21,1	928
B. ulmifolia	2001	08.05	10,2	115	16–20.06	14,8	655	16.07	23,0	1126
	2002	12.05	11,7	130	28.05–01.06	20,2	301	14.07	18,5	1015

Таблица 5

Основные характеристики прироста листьев у разных видов *Betula*

Виды и формы растений	Год наблюдения	Максимальный суточный прирост, мм²/сут.	Годичный прирост, мм²	Продолжительность роста, сут.
Betula pubescens	2001	63 ± 3,2	378 ± 18	75
	2002	73 ± 3,7	494 ± 23	55
B. pendula	2001	45 ± 2,2	370 ± 16	75
	2002	100 ± 3,2	403 ± 18	47
B. pendula var. carelica	2001	52 ± 2,7	362 ± 17	75
	2002	57 ± 2,9	408 ± 19	59
B. lutea	2001	63 ± 3,1	381 ± 15	69
	2002	90 ± 4,6	457 ± 21	67
B. mandshurica	2001	40 ± 2,0	294 ± 15	75
	2002	83 ± 4,2	269 ± 13	43
B. platyphylla	2001	42 ± 2,2	365 ± 16	69
	2002	93 ± 5,2	494 ± 24	63
B. ulmifolia	2001	56 ± 2,8	358 ± 14	69
	2002	66 ± 3,4	438 ± 21	63

Определенная изменчивость в интенсивности роста листьев разных видов *Betula* обусловливает и соответствующие различия в величине их годичного прироста, который составляет от 350 до 500 мм². Из данных табл. 5 следует, что наименьшая площадь листа (около 300 мм²) формируется у *B. mandshurica*, а у остальных изучаемых видов она достигает в среднем 400 мм². Различия в величине данного показателя обусловливаются интенсивностью, а не продолжительностью роста листьев. Так, площадь листа у *B. platyphylla* в 1,5 раза больше, чем у *B. mandshurica*, а продолжительность роста примерно одинакова (65 и 60 суток).

По данным 2-летних наблюдений, рост листьев у изучаемых видов *Betula* начинается при среднесуточной температуре воздуха +10…+16,5 °С и сумме положительных температур 100…180 °С (табл. 4). Требовательность растений к температуре воздуха в период максимального прироста листьев варьирует в широких пределах. За исследуемые годы кульминация отмечалась при среднесуточной температуре воздуха +12…+20 °С и сумме положительных температур 300…950 °С. Вероятно, сроки наступления этой фенофазы определяются не только температурным режимом воздуха, но и другими факторами среды.

Формирование листьев прекращается в первой половине июля, когда среднесуточная температура воздуха достигает максимальных за вегетацию величин (+15…+23 °С), а сумма положительных температур – 700…1100 °С.

Все изученные виды *Betula* обнаруживают сходные ритмы роста вегетативных органов с таковыми у аборигенных видов, что свидетельствует об их успешной адаптации к новым условиям обитания.

ВЫВОДЫ

1. Рост листьев у изученных видов *Betula* начинается в середине мая, а побегов – в конце мая. Различия в сроках начала этой фенофазы у изученных видов могут достигать целой недели.

2. Сроки прекращения роста побегов и листьев у разных видов *Betula* отличаются не более чем на 3–5 суток и отмечаются в первой половине июля.

3. Размеры сформированных побегов и листьев у изученных видов *Betula* изменяются по годам в значительных пределах (в 1,5−3 раза).

4. Сроки начала и кульминации прироста побегов и листьев видов *Betula* определяются комплексом факторов среды, в связи с чем они могут испытывать погодичную изменчивость в пределах одной недели.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калуцкий К. К., Болотов Н. А. Биоэкологические особенности лесной интродукции // Лесная интродукция. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 1983. С. 4–14.
2. Колесниченко А. Н. Сезонные ритмы развития древесных интродуцентов // Охрана, изучение и обогащение растительного мира. Киев: Изд-во Киевского гос. ун-та, 1985. С. 21–32.
3. Лапин П. И. Сезонный ритм развития древесных растений и его значение для интродукции // Бюл. ГБС АН СССР. 1967. Вып. 65. С. 12–18.
4. Логинов В. Б. К методике построения частных теорий интродукции // Теории и методы интродукции растений и зеленого строительства: Материалы. респ. конф. Киев: Изд-во Киевского гос. ун-та, 1980. С. 58–60.
5. Мисник Г. Е. Сроки и характер цветения деревьев и кустарников. Киев: Наука, 1976. 215 с.
6. Молчанов А. А., Смирнов В. В. Методика изучения прироста древесных растений. М.: Наука, 1967. 95 с.
7. Самцов А. С. Динамика роста листьев дуба черешчатого // Ботаника, исследования. 1966. Вып. 8. С. 52–61.
8. Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
9. Шестопалова В. В. Итоги интродукции сосновых (Pinaceae Lindl.) на Среднерусской возвышенности и перспективы их использования: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Киев, 1982. 22 с.
10. Шкутко Н. В. Хвойные Белоруссии. М.: Наука, 1991. 263 с.
11. Шутилов В. А. Интродукция видов рода клен в Камышинском дендрарии // Бюллетень ВНИИ агролесомелиорации. Волгоград, 1990. С. 32–44.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Биология** **2012**

УДК 639.3

ЛЕОНИД ПАВЛОВИЧ РЫЖКОВ
доктор биологических наук, профессор кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
rlp@petrsu.ru

FISH INDUSTRY IN KARELIAN REPUBLIC (RUSSIA)*

Information about the state and main possible ways of fishery development in the Republic of Karelia (Russia) is presented. It includes information about fisheries, aquaculture status, and reproduction of fish stock.

Key words: Fish facilities, aquaculture, fish farming, reproduction, fish harvesting, lake-river system, water environment, marine and fresh-water fishery, fish cultivation

The Republic of Karelia is located in the north-western part of the Russian Federation. It borders with the Murmansk region in the north, with Arkhangelsk region in the east, with Vologda and Leningrad regions in the south-east. The western border with Finland is the longest one; its length is 723 km. The total area of Karelia is 172.4 thousand km^2. It extends for 660 km from the north to the south and for 424 km from the west to the east [4], [6].

Karelia is rich in water bodies. More than 60 000 lakes, among them the largest ones in Europe – Lake Ladoga and Onega, cover about 21 % of the Republic area. Several thousand rivers have the total length of about 80 000 km. Most of the lakes are connected by rivers, forming lake and river systems, covering the entire territory of the republic. Most lake basins of these systems have numerous bays, guts and islands and are usually elongated from the north-west to the south-east. Most of the rivers are torrential ones. Rapids usually alternate with deep river pools (lakes) with tranquil flow. The vertical drop of the river level can serve as an indicator of rapids magnitude. For example, the river Lososinka (total length – 27 km) has the flow inclination level of 40 m, the river Suna (total length – 282 km) has the flow inclination level of 325 m, the river Shuya (total length – 265 km) has the flow inclination level of 162 m, the river Kem (total length – 358 km) has the flow inclination level of 220 m, and so on. The flow inclination levels of Karelian rivers range from 0,6 to 5,6 m per kilometer depending on the terrain configuration

To estimate the density of the lake-river system it is sufficient to note that 12 km of lakes accounts for every 100 km of total river length, that is the lake surface ratio is 12 %. The ratio of lake length to the total length of the lake-river system ranges from 25 % (Shuya) to 68 % (Kovda). Such ratio of the river length to the lake surface is unique for Russia [3], [6].

The importance of lake-river systems for formation of water and fish resources is huge. They regulate the general hydrological regime. In particular, as natural accumulators of water masses, they determine the level regime of rivers and lakes located downstream, preserve spawning grounds of valuable fish species, providing favorable conditions for their reproduction. Such storage systems help to reduce the negative impact of floods and to conserve normal water regime during summer low water. Lake-river systems reduce the magnitude of negative human impact. Suspended solids from industrial, agricultural and domestic wastewater after intensive mixing in the rapids of the rivers, arriving at deep river pools with tranquil flow are partially precipitated and then transformed into less harmful to natural water components.

The White Sea with its unique natural conditions serves as the reserve for fisheries in Karelia, along with fresh water bodies. Unlike other arctic waters, it is less connected with the ocean, but gets a huge land runoff (from 130 to 360 km^3). These conditions favor the formation of specific flora and fauna. The area of the White Sea is about 90 000 km^2, average depth of 67 m, maximum depth – 350 m, water mass volume 6 km^3. The coastline length is over 850 km in the Karelian part of the sea. The coast is mostly high and rocky with numerous bays, which contributes to the development of marine aquaculture [1], [7], [8].

Huge water resources, the uniqueness of the lake-river systems, significant length of the spawning rivers, species diversity and richness of ichthyofauna create ample opportunities for development of the fish industry (fishing, reproduction, aquaculture). Moreover, the variety of scenic and exotic aquatic facilities could attract the interest of tourism managers, especially for development of boating, sport and recreational fishing facilities.

In marine waters and fresh waters of Karelia there are 63 members of ichthyofauna, of which about half are of commercial importance [4]. Currently the main types of fisheries activity in Karelia include fishing and seafood harvesting, aquaculture in the form of cage culture and based fisheries, which focus primarily on the reproduction of valuable fish species.

Fishing. Karelian fishermen are involved both in fresh water and marine fishing Fresh water fishing is mostly developed in the northern part of Ladoga Lake and in a large water area of Onega Lake. Regular fishing is also performed in 40 major reservoirs (Vygozero, Topozere, Segozere, Pjaozero, Vodlozero, Syamozero and others). Sport and recreational fishing is developed in medium and small reservoirs. Local population is engaged in sustenance fishing in many small lakes. Recorded fish capture rate in fresh water has been very low during the last decade, ranging within three thousand tons (table 1).

Table 1

Fishing in fresh waters of Karelia (thousand tons)

Years	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Catches	2,3	2,5	1,9	1,7	2,2	2,6
Years	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Catches	2,7	2,7	2,5	2,7	2,5	2,3

Note: The information in Tables 1–5 is provided by the Ministry of Agriculture of the Republic of Karelia. Unrecorded catches account for not less than five thousand tons according to our observations. The total catches of fish in fresh water bodies of Karelia give probably 8–9 thousand tons per year.

A significant amount of algae (Laminaria, Fucus, Ahnfeltia) is harvested in the Karelian part (about 20 thousand km^2) of the White Sea. The total amount of fish and seafood harvesting in the White Sea varies within 1,5 thousand tons (table 2). Algae harvesting makes about half of this volume. Its production mainly depends on the market demand. Unfortunately the White Sea mussel stocks are not exploited.

Table 2

Fish and seafood harvesting in the White Sea (thousand tons)

Years	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Capture	1,8	1,6	2,5	1,2	1,0	0,7
Years	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Capture	0,7	0,6	0,4	0,5	0,5	0,4

Karelian entrepreneurs are engaged in marine fishing in the Barents Sea, in the coastal sea bed areas of foreign countries and in the convention areas of the Atlantic Ocean. Fish catches varied within 42–75 thousand tons in the last decade (table 3). Particularly low catches were in the middle of the decade. At present definite increase in fishing has been obtained; fish catches reached 75 thousand tons.

Table 3

Volumes of marine fishing (thousand tons)

Years	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Capture	55.1	62.1	71.1	47.0	49.3	43.0
Years	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Capture	45.1	42.3	47.5	58.3	68.3	75.5

Seafood is also harvested in the ocean waters (table 4). Its volume is small, but can be significantly increased in the long term.

Table 4

Seafood harvesting (thousand tons)

Years	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Harvesting	2,1	4,0	4,4	2,9	3,2	3,3
Years	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Harvesting	3,4	3,3	2,9	3,3	3,0	2,8

Aquaculture in the Republic of Karelia is presented by cage culture fishery and is mostly developed in fresh waters. 47 cage farms are currently operating in Karelia; they produced over 13 thousand tons of fish products in 2011. Dynamics of cage fish production during last 12 years is shown in table 5.

The main object of cage culture is the rainbow trout. The technology of its breeding is generally developed. Small amounts of whitefish and sturgeon are also raised. Favorable natural conditions of Karelia and the proximity of the vast market will contribute to further and more rapid development of new facilities.

Table 5

Fish raising at cage farms of Karelia (thousand tons)

Years	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Output	1,7	2,0	2,7	2,9	4,4	5,8
Years	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Output	7,0	9,4	12,2	12,9	10,7	13,2

Nowadays about 75 % of cage products manufactured in Russia are produced in Karelia. In the long term ecological capacity of inland water bodies of Karelia allows to increase fish production in cages up to 25–30 thousand tons. This is a real prospect. Cage fish farming is recognized in Russia as one of the most promising directions of fisheries development in inland waters and is included in the federal program of agriculture development.

Reproduction of fish stocks in Karelia is realized in hatcheries, fish farms, and in some cage farms. The main objects of reproduction are the Atlantic salmon (Salmo salar Linnaeus, 1758), freshwater salmon (Salmo salar L. morfa sebago Girard, 1853), pink (Oncorynchus gorbuscha, Walbaum, 1792), lake char (Salvelinus lepechini, Gmelin, 1788), lake trout (Salmo trutta trutta Linnaeus, 1758) and European whitefish (Coregonus albula Linnatus, 1758). Reproduction of valuable fish species is focused on the Atlantic salmon. In 2000 only 72,8 thousand mixed-age young Atlantic salmon was released in the river basin of the White Sea, whereas in 2004 this number increased to 506 thousand individuals. In subsequent years, despite some fluctuations, production of mixed-age salmon remained at a high level of 400–350 thousand individuals. Due to the reproduction activities this species is preserved in salmon rivers running into the White Sea.

The condition of freshwater salmon population in Lake Onega was critical in the 90s of the last century. The recorded catches dropped to 2 tons / year, 6–8 times less compared to the 1980s. To preserve this population in Lake Onega freshwater salmon was included in the Red Data Book of Karelia and Russia. At the same time its reproduction was significantly increased. 270 thousand mixed-age juveniles (age 1–2 years) were raised and released into the river Shuya (the basin of Lake Onega) in 2000. In subsequent years, the volume of its cultivation remained at 200 thousand individuals per year. The results of artificial reproduction manifested themselves very quickly. The total number of salmon in Lake Onega has increased significantly; the catches grew up as high as 3–5 tons / year. Catches of salmon grown from juvenile fish released from fish farms amounted to 70–75 %. The total catch of salmon in all waters of Lake Onega reaches about 100 tons / year according to I. L. Schurova and V. A. Shirokova [2].

Good results were obtained for lake char (Salvelinus lepechini) reproduction in Lake Ladoga. In the late 80s of the last century, catches of lake char in Lake Ladoga were next to nothing (catch of 0,15 tons in 1989). The annual release of 30–80 thousand yearlings of lake char resulted in 8 tons catch in 2004, and even 14 tons in 2011. Reproduction of whitefish and lake trout is carried out in small volumes and has not given positive results in the reservoirs of Karelia. Good results were obtained with the resettlement of whitefish in a lake of the Southern Urals region. The main directions of further development of the fisheries in Karelia will be: fishing, aquaculture and reproduction. The fishery will be evolving not only due to the further development of inland water bodies, but the expansion of oceanic fisheries. The latter will require modernization of the fishing fleet and development of the fish processing industry.

Cage fish farms will constitute the basis for aquaculture. Its development will include cultivation of new aquaculture species (sturgeon, whitefish), development of fish hatcheries, enhancement of fish production technology, development of effective ways to improve welfare of fish. Creation of integrated lake farms, combining cultivation of fish, sport fishing and fishing tourism also has future potential. Reproduction of fish stock will be developed through involving new species (walleye pike (*Sander vitreus*), whitefish), increase in seeding production and its quality improvement. This will require establishment of new hatcheries and raising farms, and technology improvement. These activities will result in increasing fish capture rate in Karelia up to at least 100 thousand tons / year.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

REFERENCES

1. Б е р г е р В. Я. Продукционный потенциал Белого моря. Исследования фауны морей. Т. 60 (68). СПб.: ЗИН РАН, 2007. 292 с.
2. Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. 272 с.
3. Г р и г о р ь е в С. В. Внутренние воды Карелии и их рыбохозяйственное использование. Петрозаводск: Гос. изд-во Карельской АССР, 1961. 139 с.
4. И в а н т е р Д. Э., Р ы ж к о в Л. П. Рыбы. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ. 2004. 176 с. (Мир животных)
5. Каталог озер и рек Карелии / Под. ред. Н. Н. Филатова, А. В. Литвиненко. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2001. 290 с.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Карелия и Северо-Запад. Т. 2, ч. 3. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 958 с.
7. Р ы ж к о в Л. П. Садковая аквакультура на Белом море // Материалы II Международной конференции «Экологические исследования беломорских организмов». СПб.: ЗИН РАН, 2007. С. 112–114.
8. Р ы ж к о в Л. П. Аквакультура в бассейне Белого моря // Материалы XI Всероссийской конференции с международным участием «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря». СПб.: ЗИН РАН, 2010. С. 153–154.

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Декабрь, № 8. Т. 2 **Биология** **2012**

УДК 597.2/.5

ИРИНА МИХАЙЛОВНА ДЗЮБУК
кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ikrup@petrsu.ru

РЫБНАЯ ЧАСТЬ СООБЩЕСТВА ГИДРОБИОНТОВ В РАЙОНЕ САДКОВОГО ФОРЕЛЕВОГО ХОЗЯЙСТВА*

Представлены результаты исследований рыб Лахтинской бухты Онежского озера. Выявлены изменения в видовом составе, проведен анализ данных по морфофизиологическим параметрам ерша (возраст, масса, длина, упитанность, индексы органов). Высокие показатели массы, размера и упитанности ерша свидетельствуют о благоприятных условиях для него в период работы форелевого хозяйства.

Ключевые слова: видовой состав, садковое форелевое хозяйство, ерш, морфофизиологические параметры, Онежское озеро

ВВЕДЕНИЕ

В 1996 году в Лахтинской бухте Онежского озера (одном из наиболее чистых районов), находящейся в юго-западной части водоема, было создано садковое форелевое хозяйство мощностью до 300 т рыбы в год, которое проработало до 2006 года включительно. В связи с этим сотрудниками учебно-научно-методической лаборатории экологических проблем Севера ПетрГУ с 2001 года были начаты мониторинговые исследования этого района. В период функционирования хозяйства и после его закрытия проводились гидрохимические, гидробиологические (фито-, зоопланктон, бентос, ихтиофауна) и токсикологические исследования водной экосистемы.

Целью ихтиологических работ в рамках мониторинга было проследить изменения в состоянии рыбной части сообщества экосистемы в связи с работой форелевого садкового хозяйства. Наряду с изучением видового состава рыб, обитающих в бухте, исследовались эколого-биологические особенности популяций различных видов, в том числе и ерша (*Gymnocephalus cernuus* (L.)), являющегося удобным модельным объектом, по состоянию популяции которого можно судить о состоянии водной экосистемы в целом.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Сбор ихтиологического материала проводился в Лахтинской бухте Онежского озера (рис. 1) в летний период (июнь – август) с 2001 по 2010 год при помощи ставных сетей (от 14 до 60 мм). Обработка ихтиологического материала осуществлялась по общепринятым методикам [14], [15], [16], [18]. Исследовали видовой состав рыб, возрастную, половую и размерно-весовую структуры популяций разных видов, внутренние органы рыб. Статистическая обработка проводилась с применением методов вариационной статистики [5], [12]. Всего исследовано 1500 экз. различных видов рыб, из них 320 экз. ерша.

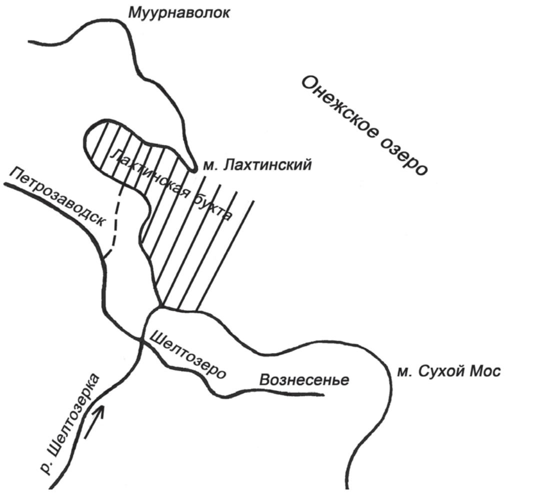


Рис. 1. Карта-схема района исследований

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В юго-западном районе Онежского озера нагуливаются лососевые и сиговые виды рыб, осуществляется нагул и нерест щуки, плотвы, леща и других рыб.

На протяжении многих лет юго-западное побережье Онежского озера давало от 2 до 19 % вылова по всему озеру в пределах Республики Карелия. Общие уловы по району во второй половине XX века колебались от 22,6 до 194,5 т. Основу уловов (70–80 %) составляли два вида – корюшка и ряпушка. В уловах присутствовали лосось, палия, форель и крупная форма ряпушки – килец. В настоящее время на промысловом уровне остаются корюшка, колюшка, карповые и окуневые. Вылов таких видов, как палия, форель, крупная форма ряпушки и некоторых других, в официальной статистике не отражен [13].

В наших уловах в юго-западной части Онежского озера встречалось 16 видов рыб, большинство из которых имеют большое промысловое значение. Это такие виды, как пресноводный лосось *Salmo salar morpha sebago* Gir., форель *Salmo trutta morpha lacustris* L., сиг обыкновенный *Coregonus lavaretus lavaretus* (L.), европейская ряпушка *Coregonus albula* (L.), лещ *Abramis brama* (L.), плотва *Rutilus rutilus* (L.), гольян *Phoxinus phoxinus* (L.), европейская корюшка *Osmerus eperlanus* (L.), щука *Esox lucius* L., налим *Lota lota* (L.), окунь *Perca fluviatilis* L., судак *Stizostedion lucioperca* (L.), ерш *Gymnocephalus cernuus* (L.), трехиглая колюшка *Casterosteus aculeatus* L. и девятииглая колюшка *Pungitius pungitius* (L.), обыкновенный подкаменщик *Cottus gobio* L. Некоторые виды в этом районе озера представлены различными экологическими формами. Например, из сигов встречается сиг ямный *Coregonus lavaretus widegreni natio onegi* Pravdin и сиг лудога *Coregonus lavaretus ludoga* Poljakov; также в уловах присутствует крупная форма ряпушки – килец *Coregonus albula kiletz* Michajlowsky. Многие виды встречаются и в Лахтинской бухте.

До создания форелевого хозяйства (по опросным данным) обычными представителями Лахтинской бухты были такие виды, как налим, ряпушка, окунь, ерш и колюшка, заходил в бухту сиг. В период функционирования форелевого хозяйства в бухте стал вылавливаться лещ, который до организации хозяйства не встречался в этом районе. Количественный состав рыб в уловах был высоким. У садков наблюдалась высокая численность леща, мелкого окуня, ерша и «ушедшей» из садков форели. Вероятно, это связано с хорошей кормовой базой: рыб привлекали остатки кормов, вымываемые из садков, и большие концентрации кормовых организмов для рыб-бентофагов (высокая численность – до 1043 экз./м² и биомасса – до 1,332 г/м² макрозообентоса, с доминированием олигохет и хирономид) [13]. В больших количествах в этот период стали вылавливать ряпушку, плотву и другие виды. Сиг перестал заходить в бухту, но это может быть результатом его усиленного вылова.

Одним из модельных объектов, по состоянию популяции которого можно судить о состоянии водной среды, является ерш (*Gymnocephalus cernuus* (L.)). Он имеет обширный ареал и встречается в различных по экологическим условиям водоемах. При этом, являясь рыбой чистых вод, ерш очень чувствителен к изменениям условий обитания и чутко реагирует на них. Обитает данный вид в чистой, прозрачной воде с песчано-каменистым дном без густых зарослей. Чаще всего встречается на глубине 2–10 м, но иногда в Онежском и Ладожском озерах он вылавливается на глубине 60–70 м. Средняя длина тела ерша из различных озер Карелии колеблется от 7,4 до 13,0 см, средняя масса – в пределах 7,0–39,0 г. Может достигать длины 20 см и массы 200 г. Созревает ерш в Карелии на 3–4-м году жизни. Нерест порционный (обычно 2–3 порции). Плодовитость ерша колеблется от 2 до 10 тысяч икринок, в южных районах Карелии – 100 тысяч икринок. Имея высокую плодовитость, ерш может при благоприятных условиях достигать большой численности. В этом случае он конкурирует в питании с молодью и взрослыми представителями ихтиофауны, такими как лещ, сиг и палия. Ерш становится активным потребителем икры ряпушки, леща, плотвы во время их размножения, но и сам является объектом питания многих хищных видов рыб [2], [6], [9], [11].

Таким образом, ерш, биоиндикатор водной среды, может оказывать большое влияние на рыбопродуктивность водоемов и, соответственно, на функционирование водной экосистемы в целом. В связи с этим мы приводим морфофизиологический анализ ерша из района функционирования садкового форелевого хозяйства Лахтинской бухты Онежского озера.

В наших исследованиях ерш был представлен 7 возрастными группами (0+–8+). Основу уловов составляли рыбы возраста 3+–4+ (21,7–42,6 %). После прекращения работы хозяйства (2010 год) уловы состояли из рыб 3+–7+ лет с преобладанием 4+–5+. Отсутствовали рыбы младших возрастов (0+–2+) и старше 7+ лет (рис. 2).

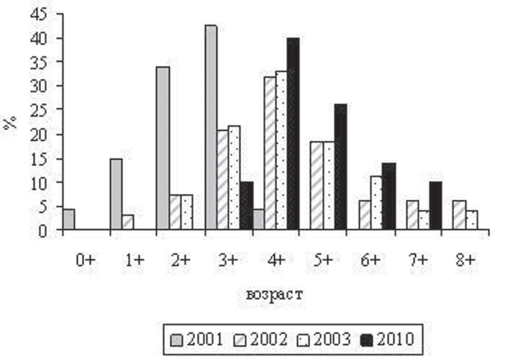


Рис. 2. Возрастная структура ерша Лахтинской бухты Онежского озера в уловах

При исследовании полового состава было выявлено преобладание самок, доля которых колебалась в разные годы от 59,5 до 83 %. Соотношение самок и самцов составляло от 1,5:1,0 до 5:1 в пользу самок. В 2010 году также преобладали самки (68 %) и соотношение составило 2:1 (рис. 3).

Рис. 3. Половой состав ерша Лахтинской бухты Онежского озера в уловах

Известно, что размеры рыб тесным образом связаны с развитием кормовой базы водоема. По мере увеличения трофности водоема улучшается и состояние кормовой базы для рыб [17], [7].

Размеры ерша Лахтинской бухты были в пределах 8,5–18,8 см и 6,0–82,0 г (рис. 4), что достоверно превышает размеры ерша из других районов Онежского озера (Кондопожская губа, район Кузаранды) [8], [10].

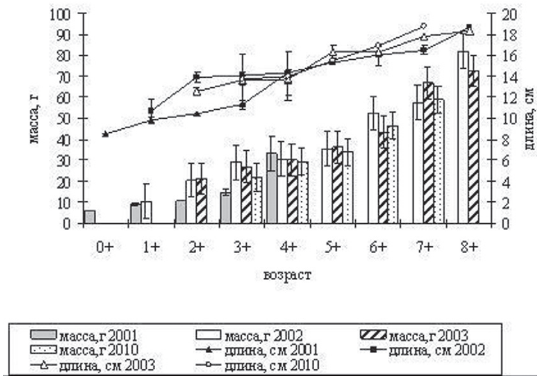


Рис. 4. Масса и длина ерша Лахтинской бухты Онежского озера

Упитанность ерша в период функционирования хозяйства в разные годы (2001–2003) изменялась от 0,9 до 2,1. Наименее упитанными были рыбы возраста 0+–2+, более упитанными – рыбы старших возрастов. Интересно, что в 2010 году, когда хозяйство уже не работало, упитанность разновозрастных рыб не выходила за пределы 0,8–1,1 (рис. 5).

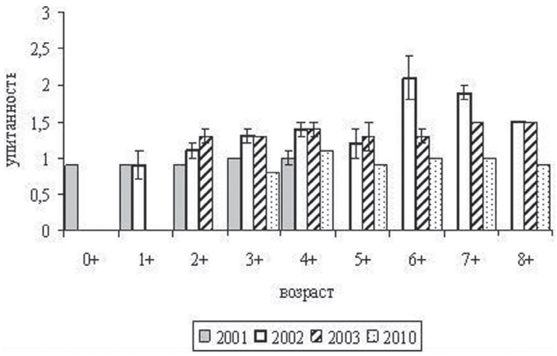


Рис. 5. Упитанность ерша Лахтинской бухты Онежского озера

В ходе исследований не было выявлено достоверных различий между самками и самцами ерша Лахтинской бухты по длине, массе и упитанности.

В качестве морфофизиологических индикаторов состояния водной среды и организма рыб в период функционирования форелевого хозяйства (2002 год) мы использовали индексы органов ерша (сердце, жабры, селезенка, печень и пищеварительный тракт) (рис. 6).

Для ерша Лахтинской бухты в период функционирования форелевого хозяйства были характерны высокие показатели относительной массы сердца (2,7–3,9 ‰). Этот показатель у ерша из других районов озера не превышает 2,2 ‰ [8], [10]. Известно, что относительный вес сердца определяется интенсивностью обмена веществ, связанного со скоростью движения. Животные, производящие интенсивные энергозатраты, обладают наиболее высоким индексом сердца [16]. Высокая относительная масса сердца ерша Лахтинской бухты является следствием высоких затрат энергии на обеспечение жизнедеятельности в сложившихся условиях среды (богатая кормовая база, жесткая пищевая конкуренция) в период работы хозяйства.

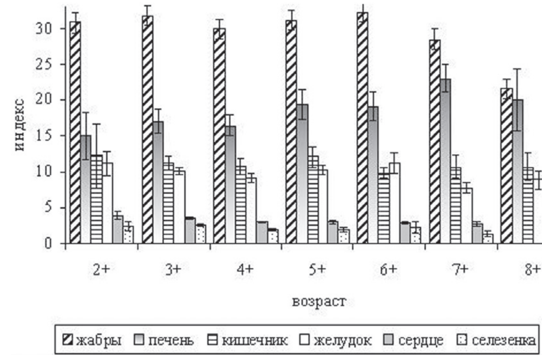


Рис. 6. Индексы органов ерша Лахтинской бухты Онежского озера, 2002 год (‰)

Индекс жабр имеет прямую связь с уровнем газообмена, а интенсивность газообмена и потребность в кислороде у рыб зависят от активности рыб, от характера пищи. При повышенной активности рыб возрастает потребность в кислороде [1]. Индекс жабр ерша был в пределах 21,6–32,2 ‰, что близко к величине относительной массы жабр ерша из других районов Онежского озера, индекс которых был в пределах 28,1–34,8 ‰ [8], [10]. Можно предположить, что активность и интенсивность газообмена ерша Лахтинской бухты близки к таковым у ерша из других районов озера. Также было выявлено, что в возрасте 8+ ерш достоверно отличается наименьшим индексом жабр (21,6 ‰) от рыб младшего возраста (2+–6+) (28,5–32,2 ‰), вероятно, активность ерша и интенсивность газообмена у него с этого возраста уменьшаются.

Масса селезенки по сравнению с массой других органов варьирует в больших пределах, что связано с ее разнообразной функциональной деятельностью: продуцирование форменных элементов крови, депонирование крови, образование лимфоцитов. Этот показатель зависит от активности рыб и кислородных условий обитания [3], [16]. Относительная масса селезенки ерша Лахтинской бухты была в пределах 1,2–2,6 ‰. Для сравнения, этот показатель у ерша из других районов озера (Кондопожская губа, район Кузаранды) не превышает 1,5 ‰ [8], [10]. Вероятно, что в условиях Лахтинской бухты в период действия форелевого хозяйства интенсивность работы селезенки у ерша была высокая. С увеличением возраста ерша индекс селезенки уменьшается, что может быть связано с перестройкой активности, метаболизма и, соответственно, интенсивности работы селезенки.

Относительная масса печени ерша Лахтинской бухты колеблется в широком диапазоне (15,0–23,0 ‰), по сравнению с ершом из других районов озера [10], [8]. Если учесть, что печень показывает возможности реализации кормовой базы видом [4], [16], то можно предположить, что у ерша Лахтинской бухты в период функционирования форелевого хозяйства они были широкие.

Это подтверждают и показатели массы желудка и кишечника ерша, которые используют в качестве характеристики обмена веществ в организме рыб, так как пищеварительный тракт перерабатывает пищевые компоненты, которые имеют различную пищевую ценность и разную степень усвояемости. Поэтому нагрузка на пищеварительный тракт существенно колеблется, что способствует изменению его относительной массы [16]. Индекс желудка ерша Лахтинской бухты был в диапазоне 7,8–11,3 ‰, а индекс кишечника – 9,9–12,3 ‰. Вероятно, нагрузка на пищеварительный тракт ерша в районе функционирования форелевого хозяйства Лахтинской бухты была значительно больше, чем у ерша из других районов озера (Кондопожская губа и район Кузаранды), индексы желудка и кишечника которого не превышали 5,4 ‰ [8], [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение регулярного экологического мониторинга Лахтинской бухты Онежского озера, в которой функционировало садковое форелевое хозяйство, показало, что в районе размещения садков произошли изменения видового состава рыб (появление леща) и отмечались высокие концентрации форели, леща, окуня и ерша. Были выявлены морфофизиологические изменения различных видов. Например, сложившиеся благоприятные кормовые условия, вызванные работой хозяйства, отразились на массе, упитанности и индексах внутренних органов ерша (биоиндикатора состояния водных экосистем).

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алеев Ю. Г., Нестерова Р. А. Зависимость степени развития дыхательной поверхности жабр от объема тела рыб // 3-я Всесоюзная конференция по морской биологии, Севастополь, 18–20 окт. 1988: Тез. докл. Ч. 1. Киев, 1988. С. 16–18.
2. Атлас пресноводных рыб России. Т. 2. М.: Наука, 2002. С. 62–64.
3. Божко А. М. О некоторых закономерностях роста и развития селезенки рыб // Биологические ресурсы Карелии: Тез. докл. Петрозаводск, 1968. С. 63–64.
4. Божко А. М. Печень как морфофизиологический индикатор условий обитания рыб // Ученые записки: Вопросы химии, физиологии, зоологии, географии. Петрозаводск, 1969. С. 38–47.
5. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 304 с.
6. Ивантер Д. Э., Рыжков Л. П. Рыбы. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. С. 121–122.
7. Кияшко В. И. Особенности роста ерша в Рыбинском водохранилище // Биология внутренних вод. Информационный бюллетень. № 46. Л., 1980. С. 31–34.
8. Клюкина Е. А., Дзюбук И. М. Математико-статистический анализ данных по результатам морфофизиологического исследования ерша Лахтинской губы Онежского озера // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 6 (111). С. 65–76.
9. Костылев Ю. В. Рыбы. Петрозаводск: Карелия, 1990. 149 с.
10. Крупень И. М. Морфофизиологические особенности ерша *Gymnocephalus cernuus* L. из различных условий обитания: Дис. … канд. биол. наук. Петрозаводск, 1999. 190 с.
11. Кудерский Л. А. Локальные стада ерша в Сямозере // Труды Карельского отделения ГосНИОРХ. Т. IV. Вып. 1. Петрозаводск, 1966. С. 183–186.
12. Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: Высш. шк., 1990. 292 с.
13. Отчет о НИР: Мониторинг Лахтинской губы Онежского озера. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. 89 с.
14. Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищ. пром-сть, 1966. 376 с.
15. Применение метода морфофизиологических индикаторов для оценки качественного состава рыб: Методические указания. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1997. 20 с.
16. Смирнов В. С., Божко А. М., Рыжков Л. П., Добринская Л. А. Применение метода морфофизиологических индикаторов в экологии рыб // Труды СевНИОРХа. Т. 7. Петрозаводск, 1972.
17. Спановская В. Д., Григораш В. А., Марков К. П. О динамике численности ерша // Зоологический журнал. 1965. Т. 44. Вып. 4. С. 561–567.
18. Чугунова Н. И. Руководство по методике определения возраста и роста рыб. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 164 с.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Биология** **2012**

УДК 582.284

ПЕТР ГЕННАДЬЕВИЧ ЗАВОДОВСКИЙ
кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
petr1483@mail.ru

ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ОБ АФИЛЛОФОРОИДНЫХ ГРИБАХ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ШОТОЗЕРЬЯ*

В статье приведены данные о 39 видах афиллофороидных грибов, найденных на территории Шотозерья.

Ключевые слова: афиллофороидные грибы, лесные экосистемы, Шотозерье

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на территории Республики Карелия выявлено 488 видов афиллофороидных грибов [6]. Список видов ежегодно пополняется, но неравномерность в изучении отдельных охраняемых территорий и районов Карелии сохраняется, что, в свою очередь, сильно затрудняет проведение полноценного сравнительного анализа видового состава афиллофороидных базидиомицетов.

До настоящего момента микологических исследований на территории Шотозерья не проводилось. Территория района исследования находится в бассейне участка р. Шуи, соединяющего озера Шотозеро и Вагатозеро. Рельеф территории в основном равнинный. На восточном побережье оз. Шотозеро рельеф переходит в грядово-холмистый. Большие площади заняты болотными участками. Территория Шотозерья входит в Пряжинский административный район [2]. Большая часть его площади занята коренными типами сосновых лесов, чистых по составу (сосняки-брусничники, черничники). В значительной мере распространены смешанные хвойно-лиственные и вторичные мелколиственные леса (березняки, осинники, ольшаники) [1].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В 2007–2009 годах автором статьи было проведено исследование биоты афиллофороидных грибов Шотозерья маршрутным методом [8; 3]. При изучении анатомической структуры был использован метод микроскопирования с применением красителей: 5 % раствор КОН и реактив Мельцера (для определения амилоидной реакции), а также 0,1 % раствор хлопчатобумажного синего (cotton-blue) для выявления цианофильности. Использовали световые микроскопы МБС-9, «Carl Zeiss», «Reichert Diavar». Собранные образцы афиллофороидных грибов помещены в гербарий Петрозаводского государственного университета (PZV). Все родовые и видовые латинские названия афиллофороидных макромицетов представлены в соответствии с изданием «Nordic macromycetes» [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований в лесных экосистемах Шотозерья зарегистрировано 39 видов афиллофороидных грибов, относящихся к 28 родам, 10 семействам и 6 порядкам. Большая часть видов афиллофороидных грибов найдена на сухостое и валеже лиственных и хвойных пород деревьев в различных типах леса и относится к сапротрофам на разрушенной древесине (Lep). Из найденных видов в Красную книгу Республики Карелия [7] занесены *Clavariadelphus pistillaris* со статусом 3 (VU) и *Antrodiella citrinella* со статусом 3 (VU). Таким образом исследуемая биота афиллофороидных грибов Шотозерья характерна для таежной зоны. В аннотированном списке приведены: латинское название вида, субстрат, тип леса, тип трофической группы, согласно классификации А. Е. Коваленко [5] и Л. Г. Буровой [4] (Lep – сапротрофы на древесине; Hu – гумусовые сапротрофы; Mr – микоризообразователи), и номер образца, если он был помещен в гербарий Петрозаводского государственного университета.

АННОТИРОВАННЫЙ СПИСОК АФИЛЛОФОРОИДНЫХ ГРИБОВ ШОТОЗЕРЬЯ

1. *Albatrellus ovinus* (Schaeff.: Fr.) Kotl. et Pouzar – почва в сосняке лишайниковом. Hu.
2. *Antrodia serialis* (Fr.) Donk – валежный ствол *Picea abies* (L.) Karst. в ельнике черничном. Lep.
3. *Antrodia xantha* (Fr.) Ryvarden – валежный ствол *Picea abies* (L.) Karst. в ельнике черничном. Lep.
4. *Antrodiella citrinella* Niemelä et Ryvarden – валежный ствол *Picea abies* (L.) Karst. в сосняке брусничном. Lep.
5. *Bjerkandera adusta* (Willd.: Fr.) P. Karst. – валежный ствол *Populus tremula* L. в осиннике злаково-разнотравном. Lep.
6. *Cantharellus cibarius* Fr.– почва в ельниках, сосняках, березняках. Mr.

7. *Clavariadelphus pistillaris* (L.: Fr.) Donk – почва в ельнике черничном. Hu.
8. *Cerrena unicolor* (Bull.: Fr.) Murrill – валежный ствол *Betula pubescens* Ehrh. в березняке чернично-разнотравном. Lep. PZV 142.
9. *Coltricia perennis* (L.: Fr.) Murrill – почва в сосняке черничном и в сосняке багульниково-сфагновом. Hu. PZV 128. PZV 130.
10. *Daedaleopsis confragosa* (Bolton: Fr.) J. Schröt. – сухостойный ствол *Salix caprea* L. на побережье. Lep. PZV 141.
11. *Datronia mollis* (Sommerf.: Fr.) Donk – валежный ствол *Populus tremula* L. в осиннике злаково-разнотравном. Lep. PZV 133.
12. *Fomes fomentarius* (L.: Fr.) J. Kickx – валежный ствол *Betula pubescens* Ehrh. на побережье. Lep. PZV 144.
13. *Fomitopsis pinicola* (Sw.: Fr.) P. Karst – валежные стволы *Picea abies* (L.) Karst. и *Pinus sylvestris* во всех типах леса. Lep.
14. *Gloeophyllum sepiarium* (Wulfen: Fr.) P. Karst. – валежный ствол *Picea abies* (L.) Karst. в ельнике черничном. Lep. PZV 132.
15. *Ganoderma lipsiense* (Batsch) G. F. Atk. – валежный ствол *Populus tremula* L. в ельнике болотно-травяном. Lep. PZV 131.
16. *Hapalopilus rutilans* (Pers.: Fr.) P. Karst. – сухостойный ствол *Sorbus aucuparia* L. на побережье. Lep.
17. *Hydnellum ferrugineum* (Fr.: Fr.) P. Karst. – почва в сосняке воронично-лишайниково-каменистом. Hu. PZV 127.
18. *Inonotus obliquus* (Pesr.: Fr.) Pilát – сухостойные и валежные стволы *Betula pubescens* Ehrh. Lep.
19. *Inonotus rheades* (Pers.) Bondartsev et Singer – валежный ствол *Populus tremula* L. в осиннике злаково-разнотравном. Lep. PZV 129.
20. *Phellinus lundellii* Niemelä – валежный ствол *Populus tremula* L. в осиннике злаково-разнотравном. Lep. PZV 137. PZV 135.
21. *Phellinus pini* (Brot.: Fr.) A. Ames – валежный ствол *Pinus sylvestris* L. в сосняке брусничном. Lep. PZV 148.
22. *Phellinus populicola* Niemelä – валежный ствол *Populus tremula* L. в березняке злаково-брусничном. Lep.
23. *Phellinus punctatus* (Fr.) Pilát – сухостойный ствол *Salix caprea* L. Lep. PZV 136.
24. *Phellinus tremulae* (Bondartsev) Bondartsev et Borissov – валежный ствол *Populus tremula* L. в сосняке багульниково-сфагновом. Lep.
25. *Phlebia centrifuga* P. Karst. – валежный ствол *Pinus sylvestris* L. в сосняке брусничном. Lep. PZV 145.
26. *Phlebiopsis gigantea* (Fr.: Fr.) Jülich – кора *Pinus sylvestris* L. и *Picea abies* (L.) Karst. в ельнике черничном и сосняке брусничном. Lep.
27. *Phellodon tomentosus* (L.: Fr.) Banker – почва в сосняке брусничном. Hu. PZV 125.
28. *Piptoporus betulinus* (Bull.: Fr.) P. Karst. – валежный ствол *Betula pubescens* Ehrh. Lep.
29. *Polyporus badius* (Pers.) Schwein. – валежный сук *Betula pubescens* Ehrh. Lep.
30. *Polyporus squamosus* Huds.: Fr. – валежный ствол *Salix caprea* L. на побережье. Lep. PZV 143.
31. *Polyporus varius* Fr. – валежный ствол *Populus tremula* L. в сосняке брусничном. Lep.
32. *Pycnoporus cinnabarinus* (Jacq.: Fr.) P. Karst – валежный ствол *Betula pubescens* Ehrh. в ельнике черничном. Lep. PZV 146.
33. *Pycnoporellus fulgens* (Fr.) Donk – валежный ствол *Picea abies* (L.) Karst. в ельнике черничном. Lep. PZV 138.
34. *Skeletocutis odora* (Sacc.) Ginns – валежный ствол *Pinus sylvestris* L. на вырубке. Lep. PZV 134.
35. *Trametes ochracea* (Pers.) Gilb. et Ryvarden – валежный ствол *Alnus incana* (L.) Moench. в березняке осоково-сфагновом. Lep. PZV 126.
36. *Trametes pubescens* (Schumach.: Fr.) Pilát – поваленный ствол *Betula pubescens* Ehrh. Lep.
37. *Trametes velutina* (Fr.) G. Cunn – валежный ствол *Populus tremula* L. на вырубке. Lep. PZV 147.
38. *Trichaptum abietinum* (Dicks.: Fr.) Ryvarden – валежные стволы *Picea abies* (L.) Karst. и *Pinus sylvestris* L. во всех типах леса. Lep.
39. *Trichaptum pargamenum* (Fr.) G. Cunn – валежный ствол *Betula pendula* Roth. в ельнике черничном. Lep.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный список афиллофороидных грибов не является исчерпывающим и в результате дальнейших микологических исследований Шотозерья может быть расширен.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипина Г. С., Кищенко И. Т., Рудковская О. А. Конспект Шотозерской конкретной флоры. Петрозаводск, 1994. 64 с.
2. Атлас Карельской АССР. М., 1989. 40 с.
3. Бондарцев А. С. Трутовые грибы европейской части СССР и Кавказа. М.; Л.: Наука, 1953. 1106 с.
4. Бурова Л. Г. Экология грибов макромицетов. М.: Наука, 1986. 221 с.
5. Коваленко А. Е. Экологический обзор грибов из порядков Polyporales s. str., Boletales, Agaricales s. str., Russulales в горных лесах центральной части Северо-Западного Кавказа // Микология и фитопатология. 1980. Т. 14. Вып. 4. С. 300–314.
6. Коткова В. М., Крутов В. И. О распространении и охранном статусе видов афиллофоровых грибов, включенных в Красную книгу Республики Карелия // Труды КарНЦ РАН. 2009. № 1. С. 43–50.
7. Красная книга Республики Карелия / Науч. ред. Э. В. Ивантер, О. Л. Кузнецов. Петрозаводск, 2007. 368 с.
8. Методы изучения лесных сообществ. СПб., 2002. 240 с.
9. Nordic macromycetes. Copenhagen, 1997. Vol. 3. 444 p.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Медицинские науки** **2012**

УДК 612.741.16:612.65+612.648

ЮЛИЯ РАФАЭЛЬЕВНА ЗАРИПОВА
кандидат медицинских наук, доцент кафедры педиатрии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
julzar@mail.ru

АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ МЕЙГАЛ
доктор медицинских наук, заведующий лабораторией новых методов физиологических исследований Института высоких биомедицинских технологий, профессор кафедры физиологии человека и животных медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
meigal@petrsu.ru

КЛИНИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОМИОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЙРОМЫШЕЧНОГО СТАТУСА У НЕДОНОШЕННЫХ ДЕТЕЙ*

При помощи клинических и электромиографических критериев охарактеризован нейромышечный статус у недоношенных детей в течение первых 6 недель жизни. В ходе клинического осмотра выявлена положительная динамика неврологического статуса. Установлено, что у недоношенных детей в первые 6 недель постнатального периода интерференционная электромиограмма (иЭМГ) имеет сходство с иЭМГ доношенного новорожденного первых дней жизни и характеризуется «упрощенной» временной структурой, низкой амплитудой и частотой, замедленной динамикой параметров ЭМГ.

Ключевые слова: недоношенные дети, нейромышечный статус, электромиография, нелинейные и линейные параметры

ВВЕДЕНИЕ

Достижения неонатальной медицины в последние десятилетия привели к значительному повышению выживаемости недоношенных детей с очень низкой (ОНМТ) и экстремально низкой массой тела (ЭНМТ). Кроме того, в связи с переходом РФ с 01.01.2012 на новые критерии живорождения, рекомендованные ВОЗ (срок гестации более 22 недель, масса тела ≥ 500 г), количество недоношенных детей будет неуклонно расти [4].

Выхаживание новорожденных, особенно недоношеных детей, послужило стимулом для развития новых направлений в различных областях медицины (нутрициологии, фармакологии, дальнейшее совершенствование офтальмологии, кардиологии, хирургии, сурдологии и т. д.). С другой стороны, наряду с совершенствованием различных направлений неотложной неонатальной помощи активно развиваются мультидисциплинарные службы, направленные на реабилитацию и абилитацию недоношенных детей и их семей.

Особенностями недоношенного ребенка являются: диффузная мышечная гипотония («поза лягушки»), быстрая «истощаемость» рефлексов, низкая мышечная масса, малоподвижность и лабильность температуры тела вследствие относительной пойкилотермности [5]. Однако основные показатели моторного развития новорожденного ребенка имеют существенные временные колебания. Очевидно, что имеет место большое различие между морфологическими и физиологическими показателями нервной системы у детей разного гестационного возраста. Вследствие этого клиницист должен владеть не только различными методиками неврологического осмотра новорожденных детей [8], [10], но и иметь углубленные знания по эволюционной неврологии.

Развитие технологий выхаживания преждевременно родившихся детей позволяет повышать их выживание и улучшать качество жизни. Однако, несмотря на создание для недоношенного ребенка оптимальных условий выхаживания, полностью ограничить его от воздействия внешних факторов невозможно, и поэтому темпы его развития будут, вероятнее всего, быстрее по сравнению с его сверстниками, находящимися еще в утробе матери. Вследствие этого при постнатальной оценке психомоторного и физического развития ребенка, родившегося преждевременно, обычно учитывается не биологический возраст после рождения, как у доношенных детей, а его постконцептуальный (ПКВ), или постменструальный, возраст, то есть возраст с момента зачатия [7], [10], [11].

Настоящая работа посвящена оценке неврологического статуса недоношенного ребенка на различных сроках постконцептуального развития с позиции онтогенетической адаптации.

Из экспериментальных исследований H. F. R. Prechtl известно, что двигательная активность является первичной по отношению к другим формам неврологической деятельности плода и младенца [3], [6]. Таким образом, именно клиническая и нейрофизиологическая оценка моторной функции младенца явилась приоритетной в данном исследовании.

Цель работы – исследовать нейромышечный статус недоношенных детей с помощью схем неврологического осмотра недоношенного ребенка: схема качественной и количественной оценки недоношенных детей в соответствии с их ПКВ (Пальчик А. Б., 2008) и новых параметров иЭМГ.

МЕТОДИКА

В группу недоношенных вошли 10 детей обоего пола низкой степени риска с гестационным возрастом 31/32 недели, средняя масса при рождении составила 1650 ± 105 г, средняя оценка по шкале Апгар – 6/7 баллов. Под низкой степенью риска подразумевается отсутствие серьезных отклонений в соматическом и неврологическом статусе ребенка. Их обследование проводилось в динамике на 2, 4 и 6-й неделе жизни (фактически в 33, 35, 37 недель посконцептуального возраста, то есть количество недель беременности + возраст после рождения в неделях). Группу контроля составили 10 доношенных детей обоего пола, родившихся в срок (38/39 недель гестации) с нормальной оценкой по шкале Апгар (8/9 баллов), средней массой тела 3430 ± 90 г, обследованных также в возрасте 2, 4 и 6 недель после рождения. Общий дизайн исследования представлен на рис. 1.

Рис. 1. Общий дизайн исследования и группы обследованных детей: Р – срок рождения (гестационный возраст в неделях), черные стрелки указывают соответствие постнатального возраста у доношенных и недоношенных детей; 0 – концепция. Пунктиром обозначен неисследованный возраст у недоношенных детей

Дети обследовались в ГБУЗ «Детская республиканская больница» (Петрозаводск), с информированного согласия мамы ребенка, с разрешения Этического комитета при Минздравсоцразвития РК.

Для объективизации полученных данных клинический неврологический осмотр проводился с помощью схем неврологического осмотра недоношенного ребенка в 33 и 35 недель ПКВ, предложенных А. Б. Пальчиком в 2008 году [3]. Общая сводная схема включает в себя 40 показателей: рефлекторный ответ на прикосновение, вздрагивание (страртл-реакция), генерализованные движения (generalized movements), изолированные движения руки и ноги, ретрофлексия головы, поворот головы, нерегулярные дыхательные движения и т. д. [3]. Оценка детей в 33 недели ПКВ проводилась по 36 показателям, в 35 и 37 недель – по всем 40 показателям (дополнительно проводилась оценка шагового рефлекса, рефлекса опоры, рефлекса Бабинского, асимметричного шейно-тонического рефлекса). Каждому показателю присваивался балл от 0 до 1,0. Интерпретация теста проводилась по сумме баллов: максимальный показатель (100 %) – 35,5 балла в 33 недели ПКВ и 37,5 балла в 35, 37 недель ПКВ, оптимальный показатель (> 90 %) – ≥ 32 балла в 33 недели и ≥ 34 балла в 35, 37 недель ПКВ, нормальный показатель (> 75 %) – ≥ 26,5 балла в 33 недели и ≥ 28 балла в 35, 37 недель ПКВ. Доношенные дети обследовались неврологически по общепринятой в отечественной неонатологической практике схеме [6]. Исследование проводилось стандартизированно с учетом окружающих условий (температурный режим), состояния обследуемого ребенка, времени после кормления.

Для регистрации иЭМГ использовали поверхностные биполярные электроды фирмы «Нейрософт» (Иваново, Россия). Усиление миоэлектрического сигнала проводили с помощью электромиографов Нейро-МВП-4 и Нейро-МВП-Микро (ООО «Нейрософт», Иваново, Россия). Запись электромиограммы производили последовательно с 4 мышц верхних и нижних конечностей (трехглавой мышцы плеча и двуглавой мышцы плеча справа; икроножной мышцы и передней большеберцовой мышцы слева) на жесткий диск для последующей обработки. Частота опроса аналого-цифрового преобразователя (АЦП) – 20 КГц, полоса пропускания сигнала – 2–1000 Гц.

С учетом того что в практику электромиографии включаются нелинейные методы обработки сигнала [9], [12], [14], нами использованы традиционные линейные и новые нелинейные методы обработки иЭМГ.

Нелинейный анализ иЭМГ (FRACTAN 4.4 ©) включал в себя измерение таких параметров, как: 1) фрактальная размерность (D), 2) корреляционная размерность (D_c), 3) корреляционная энтропия (K_2).

В линейном анализе иЭМГ использованы средняя амплитуда (A, мкВ) и средняя частота (MNF, Гц) [2].

Исследование детей проводилось между кормлениями, во время спонтанной двигательной активности и со строгим соблюдением теплового режима. Дети в 33 недели ПКВ обследовались непосредственно в боксе в условиях кувеза (температура воздуха 32 ºС, влажность 40 %). Наложение электродов и регистрация спонтанной или вызванной двигательной активности производились через окошки и дверцы инкубатора. Температура тела контролировалась с помощью накожного датчика сервоконтроля.

В 35 и 37 недель гестационного возраста дети обследовались на пеленальном столике на фоне частичного распеленания, при температуре воздуха 24–25 ºС и низкой постоянной скорости движения воздуха (0,1 м/с). Доношенные новорожденные дети обследованы в кабинете электрофизиологической диагностики на кушетке после предварительного распеленания или раздевания (1–2-минутная адаптация ребенка в развернутом виде), при температуре воздуха 24–25 ºС и постоянной скорости движения воздуха (0.1 м/с).

Статистическая обработка проведена с использованием программы Excel 2003 и SPSS 12.0™ и Statgraphics Centurion 15.0. Для определения межгрупповых различий (возрастных групп и разных групп детей) использовали W-критерий (Крускалла – Уоллиса) и U-критерий (Манна – Уитни).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Клиническая оценка недоношенных детей по схеме неврологического осмотра выявила следующие особенности. В 33 недели ПКВ оптимальный показатель развития (≥ 32 баллов) был у 2 (20 %) детей, нормальный показатель развития (≥ 26,5 балла) – у 8 (80 %) (рис. 2). Очаговая симптоматика не отмечена. Асимметрия мышечного тонуса верхних конечностей отмечена у одного ребенка (10 %), нижних конечностей – у 3 (30 %) детей.

Рис. 2. Показатель неврологического развития у недоношенных детей в 33, 35, 37 недель постконцептуального развития: максимальный показатель – 100 % баллов, оптимальный – > 90 % баллов, нормальный – > 75 % баллов

В 35 недель ПКВ получен максимальный показатель развития у 3 (30 %) детей, оптимальный – у 4 (40 %), нормальный – у 3 (30 %) новорожденных (рис. 2). Очаговая симптоматика отсутствовала. Асимметрия мышечного тонуса в ногах была выявлена у одного ребенка (10 %).

В 37 недель ПКВ максимальный показатель развития был у 5 (50 %) детей, оптимальный – у 4 (40 %), нормальный – у одного (10 %) ребенка (рис. 2). Очаговая симптоматика отсутствовала. Асимметрия мышечного тонуса в ногах была выявлена у одного ребенка (10 %).

Неврологический статус в группе контроля не выявил существенных особенностей в динамике. Необходимо отметить, что в возрасте 2 недель у 3 детей (30 %) была отмечена асимметрия мышечного тонуса верхних конечностей, в 4 недели – у 2 (20 %).

Полученные клинические данные у недоношенных детей свидетельствуют об улучшении показателей неврологического развития по мере созревания ребенка. Подобная онтогенетическая динамика очевидна именно у недоношенных детей по сравнению со своими доношенными сверстниками, что свидетельствует о большей уязвимости данной категории детей и потребности в максимально адаптированных к материнской утробе условиях выхаживания постнатально.

Результаты поверхностной ЭМГ были следующими.

У недоношенных детей в возрасте 33 недель фрактальная размерность (D) иЭМГ варьировала от 1,5 до 1,64, корреляционная размерность (D_c) и корреляционная энтропия (K_2) – от 4,0 до 5,0 в мышцах как верхних, так и нижних конечностей (табл. 1). Эти значения были достоверно меньше по сравнению с аналогичными параметрами у доношенных детей, у которых D была в пределах от 1,74 до 1,85, а D_c и K_2 достигали значений от 6,4 до 9,9.

Средняя частота спектра иЭМГ составила у 2-недельных недоношенных детей от 166 до 185 Гц, а максимальная средняя амплитуда – от 130 до 173 мкВ (табл. 2). У здоровых доношенных новорожденных данные показатели были значительно выше: от 184 до 238 Гц и от 181 до 230 мкВ (табл. 2).

У недоношенных детей в течение всех 4 недель обследования нелинейные параметры характеризовались медленным увеличением к 37-й неделе гестационного возраста (то есть к 6-й неделе жизни) (табл. 1). У доношенных детей подобной динамики не наблюдалось и значения всех нелинейных параметров оставались высокими на протяжении всего периода обследования (табл. 1).

У недоношенных детей в течение первых 6 недель жизни амплитуда и частота иЭМГ практически не изменялись, за исключением средней максимальной амплитуды в *m. triceps brachii dextra*, для которой было характерно повышение до 160–300 мкВ (табл. 2).

В нашем исследовании более низкие значения всех нелинейных параметров, которые были отмечены для недоношенных детей, характеризуют их электромиографический сигнал как «менее сложный», «более регулярный» и «более предсказуемый». Это означает, что сигнал иЭМГ генерируется меньшим количеством уравнений, то есть меньшим количеством нейронных ансамблей [5]. Вследствие недостаточной интерференции меньшего количества генераторов на иЭМГ возникают ритмы (кластеризация иЭМГ), которые визуально не всегда заметны. Появление этих ритмов и приводит к упрощению иЭМГ и ее большей предсказуемости.

Таблица 1

Показатели корреляционной размерности (D_c), корреляционной энтропии (K_2) и фрактальной размерности (D) в зависимости от гестационного и постнатального возраста в разных мышцах новорожденного ребенка

Мышца	Недоношенные дети, постконцептуальный возраст (нед.)			Доношенные дети, постнатальный возраст (нед.)		
	33	35	37	2	4	6
Корреляционная размерность (D_c)						
m. triceps br.	4,86 ± 0,51	5,12 ± 0,28	5,3 ± 0,28*	6,45 ± 2,52	7,46 ± 2,12*	6,42 ± 1,4
m. biceps br.	4,42 ± 0,37	5,26 ± 0,56	5,27 ± 0,33*	7,63 ± 1,82***	7,08 ± 1,13**	6,26 ± 2,16**
m. gastrocnemius	5,09 ± 0,75	4,67 ± 0,18	4,84 ± 0,23	7,52 ± 0,64	7,51 ± 2,96***	8,37 ± 1,34*
m.tibialis ant.	4,96 ± 0,33	5,08 ± 0,33	4,93 ± 0,33*	7,41 ± 1,86	7,03 ± 0,45***	7,4 ± 0,61*
Корреляционная энтропия (K_2)						
m. triceps br.	4,35 ± 0,21	4,26 ± 0,14	4,19 ± 0,27	9,96 ± 1,04***	9,49 ± 0,55	9,12 ± 0,19*
m. biceps br.	4,77 ± 0,33	4,5 ± 0,05	4,78 ± 1,00	9,81 ± 1,02***	7,01 ± 0,96	7,47 ± 1,65
m. gastrocnemius	4,46 ± 0,16	4,82 ± 0,65*	4,71 ± 0,49*	9,99 ± 1,71***	9,03 ± 0,73***	9,67 ± 0,38**
m. tibialis ant.	4,21 ± 0,57	3,85 ± 0,3	3,87 ± 0,33	9,37 ± 1,82**	9,22 ± 0,61**	9,01 ± 1,58**
Фрактальная размерность (D)						
m. triceps br.	1,59 ± 0,51	1,54 ± 0,09	1,66 ± 0,08	1,85 ± 0,1	1,74 ± 0,09	1,81 ± 0,14*
m. biceps br.	1,64 ± 0,09	1,62 ± 0,09	1,63 ± 0,09	1,74 ± 0,05***	1,79 ± 0,03	1,80 ± 0,04*
m. gastrocnemius	1,49 ± 0,07	1,49 ± 0,07	1,56 ± 0,07***	1,74 ± 0,11***	1,81 ± 0,07***	1,78 ± 0,07*
m. tibialis ant.	1,49 ± 0,05	1,51 ± 0,06	1,87 ± 1,09	1,81 ± 0,16***	1,79 ± 0,03	1,72 ± 0,15

Примечание. * – $p < 0,05$, ** – $p < 0,01$, *** – $p < 0,001$ при сравнении детей с 33 неделями гестационного возраста с детьми 35, 37 недель постменструального возраста и 2, 4, 6-недельными доношенными детьми.

Таблица 2

Средняя частота спектра и средняя максимальная амплитуда (мкВ) иЭМГ в зависимости от постнатального возраста в разных мышцах ребенка в первые 6 недель жизни (M ± SD, недели)

Мышца	Недоношенные дети (нед.)			Доношенные дети (нед.)		
	2	4	6	2	4	6
Средняя частота спектра						
m. biceps br.	166,35 ± 32,68	180,63 ± 45,03	163,88 ± 29,63	218,4 ± 90,99	177,08 ± 48,03	202,57 ± 73,71
m. triceps br.	185,35 ± 27,29	179,74 ± 34,54#	153,8 ± 41,4#	226,02 ± 48,47**	211,24 ± 78,05###	265,84 ± 73,71###
m. gastrocnem.	182,32 ± 21,05	188,39 ± 48,46	183,87 ± 45,82	237,55 ± 39,99	217,43 ± 28,32***	261,21 ± 71,78***#
m. tibialis ant.	171,12 ± 31,19	163,46 ± 47,15	150,41 ± 25,27#	184,39 ± 50,14***	195,78 ± 36,51	262,9 ± 124,9***
Средняя максимальная амплитуда, мкВ						
m. biceps br.	153,67 ± 53,1	162,0 ± 49,0	144,67 ± 11,9	180,75 ± 22,49***	205,0 ± 23,4***	195,25 ± 43,51
m. triceps br.	146,67 ± 30	169,93 ± 18,0	233,0 ± 76,13#	187,75 ± 35,4***	315,67 ± 131,4**	213,75 ± 51,6***
m. gastrocnem.	129,67 ± 29,57	133,33 ± 4,04	134,0 ± 9,0	190,5 ± 42,1***	216,0 ± 80,85	157,75 ± 16,8***###
m. tibialis ant.	173,0 ± 96,17	179,33 ± 48,0	176 ± 19,69	230,5 ± 69,59**	220,33 ± 74,07***	226,0 ± 41,53***

Примечание. * – $p < 0,05$, ** – $p < 0,01$, *** – $p < 0,001$ при межгрупповом сравнении с детьми 2 недель жизни; # – $p < 0,05$, ## – $p < 0,01$, ### – $p < 0,001$ при внутригрупповом сравнении с детьми 2 недель жизни.

На протяжении 6-недельного постнатального периода иЭМГ недоношенного ребенка имеет сходство с таковой доношенного новорожденного первых дней жизни и характеризуется «упрощенной» временной структурой и низкой амплитудой и частотой спектра. В отличие от доношенного новорожденного, у недоношенного ребенка динамика параметров иЭМГ замедлена. С точки зрения динамики систем это может быть следствием меньшего по сравнению со «сложным» сигналом количества нервных центров или уровней, участвующих в генерации сигнала, а также снижения количества связей между центрами (индекса кластеризации) [13]. Известно, что при увеличении числа генераторов их работа в основном асинхронна, и как следствие этого – система производит более сложный сигнал. Таким образом, у недоношенных детей начиная с 2-недельного возраста, вероятно, меньше связей между элементами нервной системы на уровнях ЦНС и большая синхронизация активности двигательных единиц.

Значения всех нелинейных параметров в группе контроля (доношенные дети) достаточно большие уже к концу 2-й недели ($D \approx 1,80$, D_c и $K_2 \sim 6,0–9,0$) и далее практически не изменяются. Это свидетельствует о том, что у 2-недельного доношенного ребенка формируется иЭМГ, уже вполне «зрелая» с точки зрения временной организации нейронного генератора, сопоставимая с иЭМГ взрослого человека.

Мы предполагаем, что резкое увеличение значений нелинейных параметров иЭМГ у доношенных детей в течение первых 2 недель после рождения является следствием перехода из внутриутробной во внеутробную среду. Основными факторами новой среды являются резкое исчезновение иммерсии, которая, как показано, может являться аналогом микрогравитации [1], и более низкая температура.

Очевидно, что из-за более короткого пребывания во внутриутробном состоянии двигательная система недоношенного ребенка менее зрелая и подготовленная к внеутробной жизни. Поэтому названные выше новые факторы среды для недоношенных детей являются даже более агрессивными. Это свидетельствует о том, что при работе с недоношенными детьми нужно особое внимание уделять именно вопросам выхаживания.

Полученные нами данные могут быть использованы для прогнозирования состояния двигательной системы недоношенного ребенка в будущем, в том числе в отдаленном (через несколько лет), как это делается по методу Prechtle с помощью видеомониторинга движений [3].

ВЫВОДЫ

В настоящей работе апробирована схема неврологического осмотра недоношенного ребенка с разным ПКВ (А. Б. Пальчик, 2008). Полученные клинические данные позволили качественно и количественно оценить психомоторный статус обследуемых детей. Результаты ЭМГ исследования нейромышечного статуса свидетельствуют о чувствительности метода у детей различного гестационного возраста и позволяют объективизировать и дополнить данные клинического осмотра.

Нам представляется перспективным обследовать детей с еще меньшей массой тела при рождении, а также в течение двух недель после рождения.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мейгал А. Ю. Онтогенетическая модель гравитации и невесомости: теоретические и практические аспекты // Физиология человека. 2011. Т. 37. № 6. С. 130–138.
2. Меклер А. А. Применение аппарата нелинейного анализа динамических систем для обработки сигналов ЭЭГ // Вестник новых медицинских технологий. 2007. Т. 14. № 1. С. 73.
3. Пальчик А. Б., Федорова Л. А., Понятишин А. Е. Неврология недоношенных детей. М.: МЕДпресс-информ, 2010. 352 с.
4. Приказ Минздравсоцразвития России № 1687н от 27 декабря 2011 г.
5. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 254 с.
6. Шабалов Н. П. Неонатология. Т. II. СПб.: Специальная литература, 2004. 608 с.
7. Bollard J. L., Kazmaier K., Driver M. A. A simplified assessment of gestational age // Pediatr. Res. 1977. Vol. 11. P. 374.
8. Dubowitz L. M. S., Dubowitz V., Mercuri E. The neurological assessment of the pre-term and full-term infant. Clinics in Developmental Medicine, № 148. London: MacKeith Press, 1999. 155 p.
9. Farina D., Merletti R., Enoka R. M. The extraction of neural strategies from the surface EMG // J. Appl. Physiol. 2003. Vol. 96. P. 1486–1495.
10. Gosselin J., Amiel-Tison C. Évaluation neurologique de la naissance à 6 ans. Presses de l'Hôpital Sainte-Justine. Montréal; Paris: Masson, 2007.
11. Grenier A. La motricité libérée du nouveau-né. Paris: Médecine et enfance, 2000.
12. Meigal A., Rissanen S., Tarvainen M. et al. Linear and nonlinear tremor acceleration characteristics in patients with Parkinson's disease // Physiol. Measur. 2012. Vol. 33. P. 395–412.
13. Stam C. J. Nonlinear dynamical analysis of EEG and MEG: Review of an emerging field // Clinical Neurophysiology. 2005. Vol. 116. P. 226–2301.
14. Sung P. S., Zurcher U., Kaufman M. Comparison of spectral and entropic measures for surface electromyography time series: a pilot study // J. Rehabil. Res. and Dev. 2007. Vol. 44. P. 599–610.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Медицинские науки** **2012**

УДК 616.61-008.64

АНАСТАСИЯ АЛЕКСАНДРОВНА МЕЛЕНТЬЕВА
ординатор отделения гемодиализа, Республиканская больница им. В. А. Баранова (Петрозаводск, Российская Федерация)
aamelenteva@rambler.ru

ОЛЬГА ЮРЬЕВНА БАРЫШЕВА
доктор медицинских наук, профессор кафедры госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
olvar@karelia.ru

ЛЮДМИЛА МИХАЙЛОВНА ХЕЙФЕЦ
кандидат медицинских наук, доцент кафедры госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
carat@sampo.ru

АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ЗУЕВ
заведующий отделением гемодиализа, Республиканская больница им. В. А. Баранова (Петрозаводск, Российская Федерация)
dialys@medicine.karelia.ru

ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ СТРАТЕГОПУЛО
заведующий нефрологическим отделением, Республиканская больница им. В. А. Баранова (Петрозаводск, Российская Федерация)
dialys@medicine.karelia.ru

МИНЕРАЛЬНО-КОСТНЫЕ НАРУШЕНИЯ ПРИ ХРОНИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНИ ПОЧЕК*

Хроническая болезнь почек является широко распространенным заболеванием, ее признаки отмечаются у каждого десятого жителя Земли. Минерально-костные нарушения – одни из особо значимых проявлений хронической болезни почек, так как встречаются практически у всех больных, имеют сложный многофакторный патогенез, значимо ухудшают прогноз, требуют особых подходов к консервативной терапии, а также своевременного оперативного лечения.

Ключевые слова: хроническая болезнь почек, хроническая почечная недостаточность, минерально-костные нарушения, вторичный гиперпаратиреоз, фактор роста фибробластов 23, ко-рецептор Klotho

Хроническая болезнь почек (ХБП) занимает среди хронических неинфекционных болезней особое место, поскольку она широко распространена (встречается, по данным различных исследований, у 6–20 % населения), связана с резким ухудшением качества жизни, высокой смертностью и в терминальной стадии приводит к необходимости применения дорогостоящих методов заместительной терапии – диализа и пересадки почки.

Около 40 % взрослых имеют повышенный риск развития ХБП, среди них значительное число больных с артериальной гипертензией, метаболическим синдромом, сахарным диабетом. Многие годы серьезность проблемы ХБП недооценивалась, она оставалась в тени других социально значимых заболеваний.

Клинические проявления ХБП могут некоторое время отсутствовать, создавая впечатление «доброкачественности» и «безвредности» болезни. Однако неопасных для жизни ХБП не бывает. Постепенно появляются клинические признаки ХБП, которые обусловлены вовлечением в патологический процесс всех органов и систем.

Одной из особо значимых представляется проблема минеральных и костных нарушений – широко распространенных осложнений ХБП. Эта патология значимо ухудшает прогноз и встречается практически у всех больных в стадии терминальной ХБП, а начальные проявления минеральных нарушений в виде внутриклеточного накопления фосфатов, компенсаторного повышения уровня FGF23 и снижения активности альфа-гидроксилазы появляются уже на ранних стадиях болезни. Минеральные и костные нарушения при ХБП подразумевают тесно взаимосвязанные лабораторные изменения, нарушения обмена костной ткани и процессы внекостной кальцификации, которые могут встречаться в различных сочетаниях.

Интерес к этой проблеме определяется прогностической значимостью этой патологии и тем, что большинство факторов минерального и костного обмена являются потенциально модифицируемыми.

Патогенез вторичного гиперпаратиреоза обусловлен несколькими механизмами, во-первых, снижением фильтрации фосфатов уже начиная с III стадии ХБП в результате снижения массы действующих нефронов. На этом этапе постоянство концентрации фосфора в крови какое-то время компенсируется снижением его реабсорбции в проксимальном извитом канальце, что регулируется паратиреоидным гормоном (ПТГ), уровень которого начинает повышаться. По мере дальнейшего прогрессирования ХБП повышенный уровень ПТГ больше не может компенсировать сниженную фосфор-экскретирующую функцию почек – развивается гиперфосфатемия. Во-вторых, происходит развитие дефицита кальцитриола (КТ) – активного метаболита витамина $Д_3$, синтезируемого в почках, что обусловлено уменьшением синтеза и активности 1-альфа-гидроксилазы по мере утраты почечной функции. К ХБП специфическим причинам падения уровня КТ можно отнести протеинурию (потеря 25(OH)D3-связывающего протеина-DBP) и низкую чувствительность кожи к ультрафиолету. Недостаток КТ вызывает снижение интестинальной абсорбции кальция и фосфора в кишечнике, а также уменьшение супрессивного эффекта на синтез и секрецию ПТГ по механизму отрицательной обратной связи, действуя через собственные рецепторы (VDR), расположенные на поверхности клеток паращитовидных желез (ПЩЖ). И в третьих, возникающая гипокальциемия воздействует на функцию ПЩЖ через недавно клонированные кальций-чувствительные рецепторы (CaSR) по принципу обратной связи, способствуя повышению секреции ПТГ, под влиянием которого в костной ткани активизируются остеокласты, приводя к усилению ее резорбции, а в почках – возрастанию реабсорбции кальция в дистальных извитых канальцах.

При уремии, в результате снижения количества CaSR и VDR рецепторов, ПЩЖ теряют чувствительность к Са и КТ, а секреция ПТГ становится постоянно высокой.

Согласно последним исследованиям, повышенный уровень фосфора плазмы независимо от уровня Ca^{2+} и КТ может непосредственно стимулировать секрецию ПТГ и гиперплазию ПЩЖ, в результате прямого влияния гиперфосфатемии на КТ-рецепторы, с нарушением связи кальцитриола со своими рецепторами, подавлением активности 1-альфа-гидроксилазы, конвертирующей 25(OH)D3 в 1,25(OH)2D3, снижением числа Са-рецепторов и развитием резистентности к действию ПТГ.

Описанные механизмы ведут к повышению секреторной активности клеток ПЩЖ, хронической сверхстимуляции синтеза ПТГ, профилерации клеток и увеличению массы паращитовидных желез, приводя к их гиперплазии [2], [3], [5], [10], [12].

Важную роль, существенно изменившую современные представления о патогенезе вторичного гиперпаратиреоза (ВГПТ), в последнее время отводят фактору роста фибробластов 23 (FGF23), синтезирующемуся в остеобластах и остеокластах в ответ на действие гиперфосфатемии и КТ и избирательно уменьшающему реабсорбцию фосфора в почках, по сути являясь фосфатурическим гормоном [1], [13]. Реализация эффекта FGF23 осуществляется через сложный рецептор, состоящий из собственного FGF-рецептора (FGFR) и ко-рецептора Klotho, экспрессирующихся в почках и ПЩЖ [10]. Действие FGF23 направлено на ингибирование проксимальной реабсорбции фосфатов, а также снижение активности альфа-гидроксилазы, что в результате уменьшает кишечную абсорбцию фосфатов [1], [13].

В настоящее время установлено, что повышение активности FGF23 происходит уже на ранних стадиях ХБП, значительно опережая увеличение ПТГ, и возрастает соразмерно снижению скорости клубочковой фильтрации, достигая максимума на V стадии ХБП, что предположительно связано с ретенцией фосфора и транзиторным увеличением внеклеточного пула фосфора по отношению к фосфору, находящемуся в циркуляции. Возникающий положительный баланс фосфатов в организме по неизвестным пока механизмам активирует остеоциты, приводя к избыточному образованию FGF23 и нормализации уровня фосфора на ранних стадиях ХБП [1], [12].

FGF23\Klotho также участвует в регуляции ПТГ, действуя через свои рецепторы в ПЩЖ, снижая экспрессию мРНК ПТГ и его секрецию. Возникающий парадокс, связанный с увеличением ПТГ на фоне фосфатурического действия FGF23 в ходе исследований, объясняется снижением экспрессии FGFR и Klotho на фоне пролиферативных и гиперпластических процессов в ПЩЖ, что приводит к относительной резистентности ПЩЖ к FGF23 с одной стороны, а с другой – нарушением геномного контроля синтеза ПТГ вследствие снижения синтеза КТ, индуцированного FGF23, что перевешивает ПТГ ингибирующее действие FGF23 на уровне ПЩЖ [1], [8].

По данным многих исследований, в последние годы была обнаружена корреляция между увеличением этого фактора в крови и прогрессированием ХБП, а также смертностью пациентов как на преддиализном этапе, так и на диализе [1], [9], [13].

Высокий уровень ПТГ приводит к высокообменному заболеванию кости, повышает процессы ремоделирования костной ткани. С морфологической точки зрения изменения соответствуют фиброзному остеиту с характерным увеличением количества остеокластов, усиленной костной резорбцией и образованием полостей с последующим замещением их фиброзной тканью. Множественные остеобласты окружены большими остеоидными массами без нормальной минерализации [3], [4]. При этом нарушается не только структурная интеграция кости, но и уменьшается ее плотность, толщина кортикального слоя, что сопряжено с высоким риском переломов.

Таким образом, факторами, способствующими развитию ВГПТ, являются: гиперфосфатемия, гипокальциемия, повышение уровня FGF23\Klotho, дефицит кальцитриола, снижение плотности VDR и Ca-SR на поверхности ПЩЖ, нарушение регуляции кальций-зависимой секреции ПТГ и повышенная пролиферация клеток ПЩЖ.

Одним из характерных клинических проявлений ВГПТ является мучительный кожный зуд, как правило, исчезающий после начала диализного лечения или выполнения паратиреоидэктомии. Характерны боли в костях, главным образом локализующиеся в поясничном отделе позвоночника, ребрах, бедренных костях, голенях, без четкой корреляции с рентгенологической картиной. Возможно развитие псевдоподагры и периартрита, при этом суставной синдром связан с отложением кристаллов пирофосфата кальция и напоминает подагру. Вследствие возникающих изменений в структуре коллагена возможны спонтанные разрывы сухожилий [4], [10], [12].

Клиническими последствиями ВГПТ чаще всего являются переломы костей различной локализации: компрессионные переломы тел позвонков, переломы ребер, трубчатых костей и развитие внекостной кальцификации, которая представляет серьезную проблему у больных с ХБП. Появление кальцификатов различных размеров возможно вблизи суставов, в коже, внутренних органах (сердце, легкие, почки, желудок, скелетные мышцы), приводя к нарушению их функции с развитием застойной сердечной недостаточности, нарушениям ритма и проводимости, снижениям перфузионной и диффузионной способности легких с развитием легочной гипертензии и гипертрофии правого желудочка. Кальцификация сердца и легких ассоциирована с высокой заболеваемостью и смертностью пациентов, получающих заместительную почечную терапию (ЗПТ). Редко депонирование кальция обнаруживается в роговице и/или конъюктиве глаза, приводя к так называемому синдрому «красных глаз» при уремии. Распространенной является кальцификация сосудов, частота развития которой у диализных больных варьирует от 3 до 83 % [12]. В патологический процесс могут вовлекаться почти все артерии: сердца, верхних и нижних конечностей, таза, брюшной полости, грудной клетки, головного мозга, глаз. Серьезной проблемой у больных с ХБП, особенно длительно получающих диализную терапию, является тяжелое ишемическое поражение кожи с формированием некрозов (на фоне кальцификации медии кожных и подкожных артериол), присоединением вторичной инфекции и высокой летальностью (до 80 %). Данный синдром известен с 1962 года, был назван Seyle кальцифилаксисом. В последующем при описании данного синдрома многими авторами также закрепилось понятие «кальцифицирующая уремическая артериолопатия». Развитию некрозов кожи с формированием язв предшествует появление на коже синюшно-фиолетовых пятен, эритематозных подкожных узелков, резко болезненных при пальпации. Как правило, поражаются нижние конечности. Болевой синдром при этом настолько выражен, что нередко требует назначения наркотических анальгетиков. Открытые кожные раны являются хорошими входными воротами для инфекций.

Известными факторами риска кальцифилаксии являются: женский пол, ожирение, сахарный диабет, недостаточность питания и гипоальбуминемия, гипотония, высокий уровень сывороточного кальция и фосфатов, дефицит протеинов C и S, гиперкоагуляция, локальные травмы, а также прием варфарина. Последний является ингибитором активации матриксного витамин К-зависимого ингибитора кальцификации (GLA-протеина) [2], [3], [12]. Описаны случаи регресса кальцификации у некоторых больных после паратиреоидэктомии или пересадки почки.

Диагностика минерально-костных нарушений при ХБП включает в себя лабораторные и инструментальные исследования. Золотым стандартом является выполнение биопсии костной ткани с последующим гистоморфометрическим исследованием, что, однако, малодоступно ввиду высокой стоимости, инвазивности и сложности технологии выполнения. Лабораторные данные, согласно рекомендациям KDIGO 2009 года, включают в себя исследование уровня кальция сыворотки (ионизированного или скорректированного по альбумину), фосфатов, ПТГ и щелочной фосфатазы начиная со стадии ХБП 3. Увеличение уровня ПТГ более 300 пг/мл является критерием наличия высокообменного заболевания кости. На ранних стадиях ХБП, при относительной сохранности альфа-гидроксилазной активности, целесообразно определение 25(OH) D3. К инструментальным методам относится выполнение ультразвукового исследования с целью верификации гиперплазированных ПЩЖ и/или сцинтиграфии. В качестве оценки внескелетной кальцификации используется эхокардиоскопия (кальциноз сердца), электронно-лучевая компьютерная томография и мультисрезовая компьютерная томография (кальциноз коронарных артерий), рентгенография (переднебоковой обзорный снимок брюшной полости и таза) [5], [10], [12].

Согласно Национальным рекомендациям по минеральным и костным нарушениями при ХБП (Российское диализное общество, май 2010 года), препаратами первой линии терапии вторичного гиперпаратиреоза являются препараты альфа-гидроксилированной формы витамина $Д_3$ – альфакальцидол, кальцитриол. Терапия препаратами данной группы эффективна в отношении угнетения паратиреоидного гормона как при ежедневном пероральном, так и при интермиттирующем пероральном и внутривенном вариантах введения. Применение внутривенного введения препаратов данной группы обосновано при терапии умеренного или выраженного вторичного гиперпаратиреоза при отсутствии достаточного эффекта от пероральных форм, а также при сомнительной комплаентности пациента в приеме пероральных форм. Благодаря плейотропным эффектам воздействия на рецепторы витамина Д, таким как противовоспалительный, антипролиферативный, снижение активности РААС, возможно ренопротективное действие данных препаратов. А снижение агрегации тромбоцитов, моделирование экспрессии ингибитора активатора плазминогена (PAI-I) в эндотелиальных клетках уменьшают риск сердечно-сосудистых заболеваний [2]. Побочными эффектами, ограничивающими прием данной группы препаратов, являются гиперкальциемия и гиперфосфатемия, ассоциированные с повышением их всасывания в кишечнике.

Из современных селективных активаторов рецепторов витамина Д наиболее распространен парикальцитол (Земплар), созданный в 1985 году. Его применение сопряжено с существенно меньшим риском развития гиперкальциемических и гиперфосфатемических осложнений, в связи с чем они могут применяться в больших дозах. Селективные активаторы рецепторов к витамину Д более эффективны в коррекции выраженного вторичного гиперпаратиреоза в сравнении с альфакальцидолом и кальцитриолом [5], [12].

Применение кальцимиметиков (Цинакалцета) приводит к значимому снижению уровней паратиреоидного гормона, кальция и фосфатов сыворотки крови у пациентов с ХБП. Также, согласно проведенным исследованиям, он эффективно подавляет пролиферацию ПЩЖ – эффект, не свойственный активным метаболитам витамина Д. Цинакалцет в сочетании с препаратами витамина Д значимо более эффективен в коррекции выраженного вторичного гиперпаратиреоза и минеральных нарушений, связанных с ним, в сравнении с изолированным приемом препаратов витамина Д. Однако применение Цинакалцета связано с большей частотой развития тошноты и рвоты.

Для предупреждения и коррекции гиперфосфатемии необходимо ограничение потребления диетарного фосфора, что в условиях лечения диализом является крайне затруднительным в связи со снижением поступления белковой пищи и риском развития белково-энергетической недостаточности.

В настоящее время широкое распространение получили фосфат-связывающие препараты, уменьшающие интестинальную абсорбцию кальция.

Традиционные соли кальция – дешевые и достаточно эффективные препараты. Однако при их применении необходимо учитывать риск всасывания значительной доли поступающего в желудочно-кишечный тракт кальция. Эта доля, по данным фармакокинетических исследований, составляет более половины от всей массы кальция, поступающего в организм больного ХБП, способствуя кальцификации сосудов и мягких тканей. Алюминийсодержащие фосфат-связывающие препараты (ФСП) и соли лантана практически не используются, что связано с выявленным в исследованиях проявлением токсичности. Наиболее изученный бескальциевый ФСП – севеламера гидрохлорид – в большинстве контролируемых исследований продемонстрировал способность тормозить процесс кальцификации артерий (в сравнении с солями кальция) [2], [3], [5], [6], [12].

В некоторых случаях повышение эффективности диализной терапии (увеличение диализного времени/кратности сеансов) может способствовать устранению гиперфосфатемии. Для коррекции гиперкальциемии и связанных с ней осложнений рекомендуется использовать диализат с уровнем кальция 1,25–1,5 ммоль/л.

К факторам, определяющим необходимость оперативного лечения, относятся: тяжелый гиперпаратиреоз (стойкий сывороточный уровень ПТГ более 800 пг/мл), рефрактерный к медикаментозной терапии, биомеханические проблемы (переломы, разрывы сухожилий квадрицепса, эпифизеолиз у детей), наличие кальцифилаксии. Вопрос о паратиреоидектомии должен обсуждаться, если расчетный вес паращитовидной железы превышает 1 г, когда концентрация ПТГ не снижается после короткого (6–8 недель) периода лечения активными формами витамина Д (Рекомендации ERA/EDTA 2000).

На сегодняшний день известно два вида паратиреоидэктомий: нехирургический, включающий введение под контролем УЗИ в гиперплазированные ПЩЖ этанола или кальцитриола, однако убедительных доказательств эффективности данного метода не представлено, и хирургическая паратиреоидэктомия, подразумеващая тотальное удаление всех гиперплазированных ПЩЖ, с возможной аутотрансплантацией части ПЩЖ под кожу плеча или предплечья.

Современные представления о ВГПТ позволяют более точно расставить акценты в отношении терапии ВГПТ, и очевидным является то, что лечение, в том числе воздействие на факторы риска прогрессирования ХБП, должно начинаться на ранних стадиях ХБП, когда скорость клубочковой фильтрации еще нормальная.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добронравов В. А. Современный взгляд на патофизиологию вторичного гиперпаратиреоза: роль фактора роста фибробластов 23 и Klotho // Нефрология. 2011. Т. 15. № 4. С. 11–20.
2. Земченков А. Ю., Герасимчук Р. П. Активаторы рецепторов витамина Д и сосудистая кальцификация // Нефрология и диализ. 2009. Т. 11. № 4. С. 276–289.
3. Милованова Л. Ю., Милованов Ю. С., Козловская Л. В. Нарушения фосфорно-кальциевого обмена при хронической болезни почек III -V стадий // Клиническая нефрология. 2011. № 1. С. 58–68.
4. Рожинская Л. Я. Вторичный гиперпаратиреоз и почечные остеопатии при хронической почечной недостаточности // Нефрология и диализ. 2000. Т. 2. № 4. С. 241–247.
5. Шило В. Ю. Селективная активация VDR-новаторский подход к профилактике и лечению вторичного гиперпаратиреоза, кардио- и ренопротекции // Клиническая нефрология. 2012. Vol. 2. P. 32–41.
6. Albaaj F., Hatchinson A. J. Phosphat control in renal disease // European Nephrology. 2007. Vol. 1. P. 30–34.
7. Gutierrez O., Isakova T., Shee E. at al. Fibroblast grouth factor 23 mitigates hyperphosphatemia but accentuates calcitriol deficiency in chronic kidney disease // J. Am. Soc. Nephrol. 2005. Jul. 16(7). P. 2205–2215.
8. Iddo Z., Ben-Dov H. G. The parathyroid is a target organ for FGF 23 in rats // J. Clin. Invest. 2007. Vol. 117 (12). P. 4003–4408.
9. Ix J. H., Shlipaki M. G., Wassel C. L. at al. Fibroblast grouth Factor 23 and early decrements in kidney function: The Heart and Soul study // Nephrol. Dial. Transplant. 2010. Vol. 25. P. 993–997.
10. Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO) CKD-MBD Work Group. KDIGO clinical practice guideline for the diagnosis, evaluation, prevention, and treatment of chronic kidney disease – mineral and bone disorder (CKD-MBD). Kidney International 2009: 76 (Suppl 113); S. 1–130.
11. Moe S. M. et al. Uraemic vascular calcification // J. R. Coll Physicians Edinb. 2004. Vol. 34. P. 280–286.
12. National Kidney Foundation. K/DOQI Clinical Practice Guidelines for Bone Metabolism and Disease in Chronic Kidney Disease // Am. J. Kidney Dis. 2003 (suppl. 3); 42. P. 1–202.
13. Shimada T., Hasegawa H., Yamazaki Y. FGF 23 is a potent regulator of vitamin D metabolism and phosphate homeostasis // J. Bone Miner. Res. 2004. Mar. Vol. 19 (3). P. 429–435.
14. Stenvinkel P., Carrero J. J., Axelsson J. et al. Emerging Biomarkers for Evaluating Cardiovascular Risk in the Chronic Kidney Disease Patient: How Do New Pieces Fit into the Uremic Puzzle? // Am. Soc. Nephrol. 2008. Vol. 3. P. 505–521.
15. Urakawa I., Yamazaki Y., Shimada T. at al. Klotho converts canonical FGF receptor into a specific receptor for FGF 23 // Nature. 2006. Dec. Vol. 7. P. 770–774.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Сельскохозяйственные науки** **2012**

УДК 635.21:632.38:578.85

ЛЮБОВЬ ПАВЛОВНА ЕВСТРАТОВА
доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой агрономии, землеустройства и кадастров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
levstratova@yandex.ru
ЕЛЕНА ВАЛЕНТИНОВНА НИКОЛАЕВА
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры агрономии, землеустройства и кадастров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ln21@mail.ru
СТАНИСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ БОГОСЛОВСКИЙ
аспирант кафедры агрономии, землеустройства и кадастров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
stas.bogoslovsky@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ БИОМАССЫ ЛЮПИНА УЗКОЛИСТНОГО НА УРОЖАЙНОСТЬ КАРТОФЕЛЯ В ПРИРОДНЫХ ОЧАГАХ *GLOBODERA ROSTOCHIENSIS* WOLL*

Показана эффективность использования люпина узколистного в качестве предшественника и сидерата для повышения урожайности картофеля и снижения инвазионной нагрузки *G. rostochiensis* в почве в условиях Карелии.

Ключевые слова: картофель, люпин узколистный, золотистая картофельная нематода

Альтернативой использованию традиционных органических удобрений при производстве картофеля является выращивание сидеральных культур, среди которых рекомендуют люпин узколистный (*Lupinus angustifolius* L.) [2], [6]. Его включение в севооборот с последующей запашкой зеленой массы в количестве 28…30 т/га увеличивает урожайность картофеля на 3,2…6,5 т/га [6]. Наряду с этим возделывание *L. angustifolius* ингибирует развитие такого вредоносного и широко распространенного фитопаразита, как золотистая картофельная цистообразующая нематода (ЗКН), вызывающая глободероз картофеля [1]. При однолетнем выращивании люпина число цист ЗКН в почве уменьшается до 59,4 % [6], при двухлетнем – до 91…92 % [2]. Эффективность применения сидерата зависит не только от нормы и способа его внесения, но и метеорологических факторов.

Цель работы – изучить перспективность использования люпина узколистного. Исследования проводили на протяжении двух полевых сезонов, отличающихся погодными условиями: первый период вегетации характеризовался пониженными значениями тепло- и влагообеспеченности растений (соответственно на 11 и 18 % по сравнению со среднемноголетними данными), а второй, наоборот, – повышенными (на 40 и 21 %). Объекты изучения – среднеранние сорта картофеля: Невский (восприимчивый к золотистой картофельной нематоде) и Sante (устойчивый) [3], клубни которых относились к массовой репродукции, сорт люпина узколистного Брянский Л-3 и локальная популяция *G. rostochiensis* (Шуйская). Схема опыта включала следующие варианты: 1) монокультура (картофель) – контроль; 2) люпин – предшественник; 3) внесение в почву надземной биомассы растений люпина; 4) выращивание люпина с последующей запашкой биомассы (сидерат). Опыт закладывали на различных полях сидерального севооборота. До посадки и во время уборки урожая картофеля отбирали образцы почвы для анализа на зараженность ЗКН. Число цист в пробах определяли с использованием флотационно-вороночного метода [5]. Динамику роста растений картофеля оценивали по биометрическим показателям (длина и число стеблей одного растения). При уборке картофеля проводили учет массы клубней по вариантам опыта. Статистическую обработку полученных экспериментальных данных осуществляли с привлечением двухфакторного дисперсионного анализа [4].

Результаты биометрических измерений показали, что внесение биомассы люпина в почву вызвало однонаправленное увеличение показателей роста растений картофеля по сравнению с контролями (монокультура). В условиях колебания метеорологических факторов полевых сезонов выращивание *L. angustifolius* неодинаково повлияло на урожайность (табл. 1). Так, при недостатке тепла и влаги на протяжении первого периода вегетации растений использование биомассы люпина в предшествующем сезоне способствовало увеличению урожайности (в 1,3…2,5 раза) во всех вариантах опыта по сравнению с контролями. В условиях второго полевого сезона, которые соответствовали биологическим требованиям культуры картофеля, выявлено незначительное снижение урожайности. Это связано с более высокой начальной инвазионной нагрузкой *G. rostochiensis* в почве (табл. 2).

Таблица 1

Урожайность картофеля на фоне различного использования биомассы люпина

Сорт (фактор А)	Вариант опыта (фактор В)	Урожайность, т/га		
		1-й полевой сезон	2-й полевой сезон	В среднем за два года
Невский (контроль)	Монокультура (контроль)	15,8	25,4	20,6
	Люпин-предшественник	27,4**	17,4	22,4
	Внесение в почву надземной массы растений люпина	34,3**	19,4	26,9
	Люпин-сидерат	40,0**	21,9	31,0
Sante	Монокультура (контроль)	8,0*	18,0*	13,0
	Люпин-предшественник	10,7*	16,9	13,8
	Внесение в почву надземной массы растений люпина	13,1*	14,6*	13,9
	Люпин-сидерат	17,0*/**	17,7*	17,4
$НСР_{05A}$		5,9	3,0	
$НСР_{05B}$		8,3	–	
$НСР_{05AB}$		11,8	–	

Примечание. Достоверные отклонения от контроля: * – по фактору А ($F_т$ = 4,32); ** – по фактору В ($F_т$ = 3,07).

Таблица 2

Изменение плотности популяции *G. rostochiensis* при различных способах использования биомассы люпина узколистного

Сорт	Вариант опыта	Число цист, шт. / 100 г почвы					
		1-й полевой сезон			2-й полевой сезон		
		Начальное	Конечное	Коэффициент размножения	Начальное	Конечное	Коэффициент размножения
Невский	Монокультура (контроль)	33	45	1,4	11	36	3,3
	Люпин-предшественник	20	24	1,2	43	107	2,5
	Внесение в почву надземной массы растений люпина	16	18	1,1	43	81	1,9
	Люпин-сидерат	16	15	0,9	41	55	1,3
Sante	Монокультура (контроль)	47	50	1,1	16	19	1,2
	Люпин-предшественник	46	30	0,7	43	39	0,9
	Внесение в почву надземной массы растений люпина	21	13	0,6	103	82	0,8
	Люпин-сидерат	17	6	0,4	48	30	0,6

В среднем за два года установлен положительный эффект от использования люпина. Наибольшие прибавки урожая получены в варианте возделывания *L. angustifolius* в качестве сидерата: у сорта Невский – 10,4 т/га, Sante – 4,4 т/га.

Исследования зараженности почвы фитопаразитом в неблагоприятных для него условиях первого полевого сезона (см. [1]) показали, что в вариантах с монокультурой увеличилось число цист нового поколения. При различных способах использования люпина выявлена тенденция снижения (в 1,2…2,8 раза) численности ЗКН.

В благоприятных для развития ЗКН условиях второго сезона также зарегистрировано наибольшее увеличение числа цист в контролях. Применение биомассы люпина в основном обеспечило меньшую интенсивность цистообразования.

В годы исследований выращивание устойчивого сорта Sante в сочетании с сидерацией обеспечило максимальное снижение коэффициента размножения фитогельминта за период вегетации растений картофеля.

Таким образом, в условиях Карелии использование люпина узколистного как сидерата вызывает увеличение урожайности среднеранних сортов картофеля Невский и Sante, а также снижает в почве инвазионную нагрузку *G. rostochiensis*.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов Б. В. и др. Защита картофеля от болезней, вредителей и сорняков. М.: Картофелевод, 2009. 272 с.
2. Бутенко К. О. Нематоды картофеля Центрального региона России (фауна, эпифитотиология, меры борьбы): Автореф. дис. … канд. биол. наук. М., 2004. 21 с.
3. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. РФ. Т. 1. Сорта растений. М., 2009. 321 с.
4. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1979. 416 с.
5. Методы исследования нематод сельскохозяйственных растений, почвы и насекомых. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 174 с.
6. Субботин А. С. Урожай и качество картофеля при использовании различных систем удобрений в юго-западной части Нечерноземной зоны: Автореф. дис. … канд. с.-х. наук. М., 1999. 21 с.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Сельскохозяйственные науки** **2012**

УДК 636.2

СВЕТЛАНА ГЕННАДЬЕВНА ШТЕРКЕЛЬ
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
shterkels@petrsu.ru

АНАТОЛИЙ ЕФРЕМОВИЧ БОЛГОВ
доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
bolg@psu.karelia.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВЕННО-СЕЛЕКЦИОННОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПЛЕМЕННЫХ ЗАВОДОВ АЙРШИРСКОГО СКОТА В КАРЕЛИИ*

Изучены производственные, селекционные и экономические показатели племенных заводов в Республике Карелия: ОАО «Племенное хозяйство “Ильинское”» и ОАО «Племсовхоз “Мегрега”». Хозяйства имеют высокопродуктивные стада с удоем 7300–7500 кг молока на корову в год. Реализация племенного молодняка составляет 65–102 головы в год. Уровень рентабельности молочного скотоводства – 7–20,3 %. Племенные заводы в Карелии являются высокоэффективными предприятиями, которым необходимо вести работу по повышению содержания жира и белка в молоке, снижению себестоимости продукции, по обеспечению получения и выращивания конкурентоспособных бычков.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, айрширская порода, племенные заводы, молочная продуктивность, воспроизводство, селекция, быкопроизводящая группа

Племенные заводы – высшая форма племенных хозяйств. Их главная задача – производство молока, получение, выращивание и реализация племенного молодняка, в первую очередь бычков для племенных предприятий и станций искусственного осеменения [2]. В Карелии функционируют два племенных завода по разведению айрширского скота: ОАО «Племенное хозяйство “Ильинское”» (далее «Ильинское») и ОАО «Племсовхоз “Мегрега”» (далее «Мегрега»). Оба хозяйства являются ведущими предприятиями по производству молока и племенной продукции в республике. Цель исследования – изучить эффективность производственно-селекционной и экономической деятельности племенных заводов айрширского скота в Карелии. Для анализа использовали материалы годовых отчетов, бонитировки скота и карточки племенных хозяйств за последние 5 лет. Изменения основных показателей производственной деятельности «Ильинского» и «Мегреги» за последние 5 лет представлены в табл. 1.

Обеспеченность молочного скота сельскохозяйственными угодьями, в том числе пашней, в обоих хозяйствах за последние годы сократилась в связи со значительным ростом поголовья крупного рогатого скота, что создает трудности в обеспечении поголовья кормами собственного производства.

В «Ильинском» поголовье крупного рогатого скота увеличилось на 216 голов, в том числе коров на 130 голов (на 10,6 и 14,4 % соответственно), в «Мегреге» – на 600 голов, в том числе коров на 230 голов (на 24,5 и 23 % соответственно). При таких высоких темпах роста поголовья скота требуется большое количество дополнительных помещений для скота, кормов, рабочей силы и других материально-технических ресурсов.

Несмотря на это оба хозяйства не только удержали высокий уровень продуктивности, но и значительно его повысили. В «Ильинском» удой на фуражную корову значительно возрос: с 7033 до 7584 кг молока (на 551 кг, или 7,8 %). Однако при этом не удалось сохранить прежний уровень содержания жира в молоке. Он снизился на 0,06 %. В «Мегреге» продуктивность коров возросла с 6582 до 7380 кг молока (на 798 кг, или 12,1 %), что также снизило содержание жира в молоке на 0,12 %. Продуктивность айрширских коров в племенных заводах нашей республики выше, чем в племенных заводах по России (удой 6260 кг, жирность молока 4,13 %, содержание белка 3,3 %) [1].

В «Ильинском» достигнуты неплохие результаты при выращивании племенных телок. Среднесуточный прирост живой массы телок увеличился с 675 до 714 г. В «Мегреге» этот показатель снизился с 626 до 583 г (на 43 г, или 6,8 %), что свидетельствует о недостаточной работе специалистов при выращивании молодняка. Ежегодное повышение уровня кормления животных по расходу кормовых единиц на 1 условную голову с 51,2 до 56,9 ц к. ед. («Ильинское») и с 41,9 до 48,7 ц к. ед. («Мегрега») говорит о работе специалистов по укреплению кормовой базы.

Изменения основных селекционных показателей в «Ильинском» и «Мегреге» за последние 5 лет представлены в табл. 2.

Таблица 1

Основные показатели производственной деятельности в ОАО «Племенное хозяйство “Ильинское”» и ОАО «Племсовхоз “Мегрега”»

Показатель	«Ильинское»		«Мегрега»	
	Год			
	2007	2011	2007	2011
Наличие сельхозугодий (всего, га)	3406	3406	4076	4076
Приходится сельхозугодий на 1 голову КРС, га	1,7	1,5	1,7	1,2
в том числе пашни	1,3	1,2	1,2	0,9
Поголовье КРС (всего, голов)	2038	2254	2447	3047
в том числе коров	900	1030	1000	1230
Удой на фуражную корову, кг	7033	7584	6582	7380
Содержание жира в молоке, %	3,95	3,89	4,06	3,94
Среднесуточный прирост живой массы телок 0–18 мес., г	675	714	626	583
Годовой расход кормов на 1 условную голову, ц к. ед.	51,2	56,9	41,9	48,7

Таблица 2

Основные селекционные показатели в ОАО «Племенное хозяйство “Ильинское”» и ОАО «Племсовхоз “Мегрега”»

Показатель	«Ильинское»		«Мегрега»	
	Год			
	2007	2011	2007	2011
Удой первотелок, кг	6270	6943	5884	6723
Содержание жира в молоке, %	4,14	4,19	4,31	4,03
Средняя интенсивность молокоотдачи, кг/мин.	2,29	2,18	1,8	1,81
Живая масса первотелок, кг	477	489	476	480
Удой полновозрастных коров, кг	7270	7833	6733	7523
Содержание жира в молоке, %	4,06	4,01	4,35	4,09
Живая масса, кг	516	531	505	556
Продано племенного молодняка, голов	70	102	65	64

Породность и классность коров в обоих хозяйствах высокая: все животные чистопородные и классов «элита-рекорд» и «элита».

В «Ильинском» удой первотелок увеличился на 673 кг, или 10,7 %, и составил 86,2–88,6 % от удоя полновозрастных коров, а в «Мегреге» – на 839 кг, или 14,3 и 87,4–89,4 % соответственно, что свидетельствует о хорошей организации раздоя животных. В обоих хозяйствах произошло снижение содержания жира в молоке, причем в «Мегреге» это снижение было очень значительным: на 0,26–0,28 %. Следует отметить значительное различие по содержанию жира в молоке по производственному отчету и по бонитировке. В среднем оно составило 0,11–0,27 %, однако за последние годы эта разница сократилась, что свидетельствует о повышении точности определения жира в молоке.

При селекции молочного скота важным признаком является интенсивность молокоотдачи [3]. В «Ильинском» этот показатель можно считать оптимальным – 2,18–2,29 кг/мин., а в «Мегреге» интенсивность молокоотдачи низкая (в пределах 1,8 кг/мин.), что, возможно, обусловлено погрешностями измерения этого признака.

Живая масса коров является важной предпосылкой высокой молочной продуктивности, поскольку крупные животные могут лучше переносить высокие физиологические нагрузки. В «Ильинском» прибавка живой массы полновозрастных коров составила 15 кг, первотелок – 12 кг. В «Мегреге» этот показатель увеличился на 51 кг, у первотелок – лишь на 4 кг, что является тревожным фактом и говорит о недостаточном внимании к вопросу повышения их живой массы. В целом живая масса первотелок в обоих стадах находится на уровне 476–489 кг, полновозрастных коров – 505–556 кг, что соответствует оптимальной живой массе коров айрширской породы.

По продаже племенного молодняка ситуация в хозяйствах различается. Так, в «Ильинском» объемы продажи увеличились на 45,7 % (с 70 до 102 голов), тогда как в «Мегреге» остались на уровне 64–65 голов в год. Изменения основных показателей воспроизводства в «Ильинском» и «Мегреге» за последние 5 лет представлены в табл. 3.

Таблица 3

Основные показатели воспроизводства в ОАО «Племенное хозяйство “Ильинское” и ОАО «Племсовхоз “Мегрега”»

Показатель	«Ильинское»		«Мегрега»	
	Год			
	2007	2011	2007	2011
Ввод в стадо первотелок, %	23	24,8	35	29
Выбытие коров, %	25	28,3	21	29
Выход телят, %	85	79	84	76
Продолжительность хозяйственного использования, отелов	4,1	4,1	3,3	3,4
Возраст телок при 1-м осеменении, мес.	15	15,6	17	18
Живая масса телок при 1-м осеменении, кг	377	376	372	373

Увеличение выбраковки коров в обоих хозяйствах свидетельствует об омоложении стада. Рост продуктивности коров отрицательно отразился на показателях воспроизводства. Так, выход телят снизился с 84–85 до 76–79 %. Что касается продолжительности производственного использования коров, то в «Ильинском» она составила 4,1 отела по сравнению с 3,3–3,4 отела в «Мегреге», хотя желательно использовать коров более продолжительное время. Живая масса племенных телок при первом осеменении достаточно высокая и составляет 372–377 кг, однако в «Ильинском» они достигают ее в возрасте 15–15,6 месяца, что на 2–2,4 месяца раньше, чем в «Мегреге». Это свидетельствует о том, что специалисты «Ильинского» большое внимание уделяют интенсивности выращивания племенных телок.

Динамика селекционно-экономических показателей в «Ильинском» и «Мегреге» за последние 5 лет представлена в табл. 4. Содержание белка в молоке «Мегреги» выше, чем в молоке «Ильинского». В последние годы специалисты хозяйств добились увеличения содержания белка в молоке на 0,06–0,19 %.

Таблица 4

Динамика селекционно-экономических показателей в ОАО «Племенное хозяйство “Ильинское”» и ОАО «Племсовхоз “Мегрега”»

Показатель	Год				
	2007	2008	2009	2010	2011
«Ильинское»					
Содержание белка в молоке, %: по производственному отчету	–	–	3,1	3,1	3,1
по бонитировке	–	–	3,00	3,01	3,08
Быкопроизводящая группа коров (всего, голов)	18	20	20	20	20
Средний удой коров быкопроизводящей группы, кг	–	9768	10 237	10 446	10763
Содержание жира, %	–	4,14	4,16	4,09	4,09
Содержание белка, %	–	2,99	3,00	3,00	3,05
Число коров с удоем 7000 кг и более	339	450	475	501	527
Себестоимость, руб./ц: молока	903	1317	1366	1480	–
прироста живой массы	10 219	14 004	14 489	15 960	–
Рентабельность молочного скотоводства, %	15	8	7	8	–
«Мегрега»					
Содержание белка в молоке, %: по производственному отчету	3,2	3,2	3,2	3,2	–
по бонитировке	3,4	3,04	3,10	3,17	3,26
Быкопроизводящая группа коров (всего, голов)	20	20	32	20	20
Средний удой коров быкопроизводящей группы, кг	8707	9216	9297	9402	10418
Содержание жира, %	4,32	4,27	4,20	4,21	4,14
Содержание белка, %	3,4	3,05	3,12	3,15	3,24
Число коров с удоем 7000 кг и более	204	234	416	491	542
Себестоимость, руб./ц: молока	1028	1443	1425	1621	1773
прироста живой массы	12 424	12 398	13 793	16 165	16 082
Рентабельность молочного скотоводства, %	20,3	16,2	14,7	12,0	16,0

Особенностью племенных заводов является наличие коров быкопроизводящей группы. В «Ильинском» превосходство этой группы коров по удою над средним по стаду составило 2246–3088 кг молока, а в «Мегреге» – 2605–3248 кг молока. По содержанию жира в молоке в 2008 году различий практически не было, а к 2011 году они возросли до 0,06–0,08 % в пользу быкопроизводящей группы, что говорит о повышении эффективности отбора племенных животных.

В стадах племенных заводов происходит постоянный рост численности коров с продуктивностью 7000 кг молока и более. Так, в «Ильинском» количество высокопродуктивных животных увеличилось с 339 до 527 голов, или на 55,5 %, а в «Мегреге» – с 204 до 542 голов, или в 2,65 раза.

Себестоимость производства центнера молока в «Ильинском» возросла на 577 руб., или 63,9 %, прироста живой массы – на 5741 руб, или 56,2 %. В «Мегреге» – на 593 руб., или 57,7 %, и 3741 руб., или 30,1 %, соответственно. Причиной этого, вероятно, явился рост стоимости энергоносителей, оборудования, закупаемых кормов.

Различные темпы роста себестоимости продукции отразились на рентабельности молочного скотоводства. В «Ильинском» темпы роста себестоимости продукции животноводства были выше, поэтому, вероятно, произошло более резкое снижение рентабельности молочного скотоводства с 15 до 8 %. В «Мегреге» себестоимость увеличилась меньше и как следствие – незначительное снижение рентабельности – с 20,3 до 16,0 %.

Таким образом, племенные заводы являются высокоэффективными предприятиями по производству молока и племенной продукции в Республике Карелия. Однако специалистам обоих хозяйств следует уделить пристальное внимание улучшению показателей воспроизводства, а специалистам «Мегреги» – еще и интенсивности выращивания племенных телок.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ежегодник по племенной работе в молочном скотоводстве в хозяйствах Российской Федерации (2011 год). М.: Изд-во ФГБНУ ВНИИплем, 2012. 296 с.
2. Костомахин Н. М. Скотоводство: Учебник. СПб.: Лань, 2007. 432 с.
3. Суллер И. Л. Селекция крупного рогатого скота молочных пород: Учеб. пособие. СПб.: Проспект Науки, 2012. 128 с.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Сельскохозяйственные науки** **2012**

УДК 630*165+630*651.71

АНАТОЛИЙ ПЕТРОВИЧ ЦАРЁВ
доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесного хозяйства лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
tsarev@psu.karelia.ru
НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ЛАУР
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесного хозяйства лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
laur@psu.karelia.ru
ВАДИМ АНАТОЛЬЕВИЧ ЦАРЁВ
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры управления производством экономического факультета, Воронежская государственная лесотехническая академия (Воронеж, Российская Федерация)
vadbat@comch.ru

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛЕСНОЙ СЕЛЕКЦИИ*

Рассмотрены результаты испытания семенного потомства плюсовых деревьев сосны обыкновенной и гибридов осины. Показано, что потомство отдельных деревьев сосны обыкновенной в возрасте 17–19 лет значительно превышало по объему стволов контроль. Использование гибридного материала осины позволило получить насаждения, в 2–3 раза превышающие запасы контрольных посадок. Лучшие варианты гибридов показали рекордные запасы здоровой стволовой древесины (267–508 м^3/га в возрасте 29 лет).

Ключевые слова: лесная селекция, экономическая эффективность, плюсовые деревья, сосна обыкновенная, гибриды осины

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В значительной степени повышение продуктивности лесных насаждений обязано достижениям лесной генетики и селекции. Начиная с 1920-х годов исследуются генетические особенности лесных древесных растений. В нашей стране это направление сначала развивалось по инициативе отдельных исследователей [1], [2], [4], [9], [13] и др. На государственном уровне оно получило поддержку с 1930-х годов. Сейчас уже никто не оспаривает, что при создании плантационных насаждений, предназначенных для ускоренного выращивания древесины, невозможно существенно поднять уровень продуктивности без использования селекционно улучшенного и сортового репродуктивного материала. Использование такого материала также повышает эффективность полезащитных лесных полос и специализированных насаждений (на выращивание декоративной древесины, получение таннидов, прута для лозоплетения и др.). Во всех этих случаях невозможно получить эффективные результаты, используя случайный несортовой материал.

Однако систематические работы с лесными породами в этом направлении в разных регионах нашей страны не всегда находятся на должной высоте. Многие современные лесопромышленники, которые обязаны кроме рубки заниматься и лесовосстановлением, часто прибегают к дешевому и удобному способу – облесению вырубки от стены леса. Однако это может привести к тому, что на месте сосны и ели вырастут не всегда здоровые осина и береза. Пренебрежение возможностями повышения продуктивности лесов за счет использования достижений лесной генетики и селекции обрекает людей на дефицит лесоматериалов.

Цель настоящей работы заключается в обобщении некоторых результатов, полученных при использовании генетико-селекционных подходов в лесном хозяйстве, что позволит выбрать наиболее эффективный путь лесовосстановления и лесопользования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы, представленные и проанализированные в настоящей работе, получены на опытных объектах *Pinus sylvestris* L., заложенных в Карелии, и на коллекции гибридов *Populus tremula* L., заложенных в Центральном Черноземье. Полевые наблюдения за ростом потомства от плюсовых деревьев сосны обыкновенной были проведены на трех участках испытательных культур (поля 10, 12, 13, каждое площадью в 1 га), заложенных по методу бесповторностного для плюсовых деревьев опыта под руководством Ф. А. Чепика в бывшем Заозерском лесничестве Петрозаводского лесхоза. Тип леса черничниковый. Бонитет насаждений II–III. Ко времени наблюдений возраст растений достигал 17–19 лет. По фактически измеренным высотам и диаметрам определялись объемы видовых цилиндров, а затем и объемы стволов потомств при среднем коэффициенте формы. Видовое число для данных условий и возраста растений сосны обыкновенной равно 0,53 в соответствии с таблицами хода роста А. В. Тюрина [10]. Для статистической обработки данных измерений использовались стандартные процедуры [8].

Экономический эффект рассчитывался на основе сопоставления продуктивности плюсовых деревьев или отдельных гибридных семей по сравнению с контролем. В качестве контроля для исследуемых плюсовых деревьев принималась величина средней совокупности роста растений по каждому отдельно взятому полю. Превышение выражалось в разности абсолютных величин ($м^3 \cdot 10^{-3}$) или в относительных (%).

Наблюдения за ростом гибридов осины, полученных В. П. Петрухновым, были проведены на территории Семилукского селекционного питомника Воронежской области. Возраст насаждений – 29 лет, условия произрастания D_{1-2}. Участок площадью 0,93 га заложен оригинатором весной 1982 года гибридными сеянцами при размещении 2 × 5 м. Всего были высажены 1093 сеянца от 9 гибридных семей, полученных от гибридизации на срезанных ветвях в вегетационных боксах в контролируемых условиях. Выгонка пыльцы также осуществлялась на срезанных ветвях, что позволило совместить сроки цветения разных форм гибридов и чистоту опылений [5]. На участке вначале ежегодно, а затем периодически проводилось определение сохранности растений, замеры высот и окружности ствола, а также степень их повреждения болезнями. В качестве контроля к гибридам использовалось полусибсовое потомство местной осины, произрастающей в Учебно-опытном лесхозе Воронежской государственной лесотехнической академии. Объемы стволов определялись по таблицам А. В. Тюрина [10].

Запас насаждений гибридных семей осины находился путем суммирования фактических объемов всех деревьев на делянках и перевода полученных запасов на делянках в запас на единицу площади (1 га). При этом использовалась следующая формула:

$$W = W' \times 10000 / S, \qquad (1)$$

где W – расчетный запас стволовой древесины, $м^3$/га; W′ – фактический запас стволовой древесины на делянках, $м^3$; S – площадь делянки, занимаемой одной гибридной семьей, $м^2$; 10 000 – площадь одного гектара, $м^2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование потомства плюсовых деревьев сосны обыкновенной

Сосна обыкновенная является полиморфным видом. Из большого количества форм, описанных Л. Ф. Правдиным [6], 31 выделен по форме кроны и ствола, 9 – по строению корки, 21 – по размерам и окраске хвои, 12 – по окраске стробилов и строению шишек, 3 – по качеству древесины, 5 – по цвету семян. Дальнейшие уточнения формового разнообразия сделаны П. И. Молотковым и И. Н. Патлаем [17]. Однако эти классификации не исчерпывают всего многообразия форм сосны обыкновенной. Каждый древостой состоит из множества деревьев, различающихся морфологическими, анатомическими, физиологическими и другими признаками. Среди них встречаются формы, обладающие ценными свойствами, которые могут стать объектом отбора.

Долгое время селекция сосны обыкновенной развивалась по пути отбора плюсовых деревьев без их генетической оценки. Однако далеко не все плюсовые деревья передают свои хозяйственно ценные признаки потомству. Это объясняется очень высоким уровнем гетерозиготности по количественным признакам, а также тем, что эти признаки находятся под сильным влиянием окружающей среды. Создание продуктивных насаждений посадочным материалом, выращенным из семян, полученных на лесосеменных плантациях, где сосредоточены клоны плюсовых деревьев, остается главным направлением разведения сосны обыкновенной. Вместе с тем требуются исследования по оценке плюсовых деревьев, испытанных по потомству. Такие испытания и проводятся в Петрозаводском центральном лесничестве. В настоящей работе анализируются данные, полученные на отмеченных выше трех полях (10, 12, 13). Некоторые результаты наблюдений для примера приведены в табл. 1.

Превышение у достоверно лучше растущих потомств отдельных плюсовых деревьев над контролем варьировало на разных полях. Так, на поле № 12 превышение объемов стволов потомств лучших плюсовых деревьев над контролем составляло 20–25 %. На поле № 13 превышение варьировало от 17 до 114 %, на поле № 10 – 30–75 %. Такие огромные превышения могли быть также вызваны варьированием среды, несвоевременными рубками ухода и отсутствием повторений опыта для потомств отдельных плюсовых деревьев. В связи с этим данные исследования должны быть продолжены для уточнения их результатов. Еще больший эффект выявлен при сравнении средних величин объемов стволов у пяти лучших и пяти худших потомств на каждом поле (табл. 2). Приведенные данные показывают, что рост потомства от лучших плюсовых деревьев превышает рост потомства от худших деревьев в 2 раза.

Анализ вышеприведенных данных позволяет заключить, что использование селекционно улучшенного материала сосны обыкновенной значительно увеличивает продуктивность создаваемых насаждений и их экономический эффект.

Таблица 1

Средние показатели роста 19-летнего потомства плюсовых деревьев сосны обыкновенной на испытательных культурах Петрозаводского центрального лесничества (поле № 10)

№ ПД	Кол-во исследованных потомков	Высота, м		Диаметр, см		Объем ствола, м³ · 10⁻³	Процент к контролю
		$\bar{X} \pm s\bar{x}$	Достоверность различий*	$\bar{X} \pm s\bar{x}$	Достоверность различий*		
158	113	6,80 ± 0,07	±	11,75 ± 0,14	+	39,1	175
681	113	6,95 ± 0,06	+	10,00 ± 0,07	+	28,9	130
1101	105	6,35 ± 0,10	–	7,20 ± 0,18	–	13,7	61
1078	107	5,65 ± 0,08	–	7,75 ± 0,10	–	14,1	63
453	119	6,15 ± 0,11	–	8,70 ± 0,23	±	19,4	87
450	119	7,30 ± 0,11	+	8,65 ± 0,16	±	22,7	102
155	137	6,75 ± 0,15	±	8,95 ± 0,11	±	22,5	101
835	59	6,80 ± 0,13	±	8,40 ± 0,32	±	20,0	85
375	51	6,70 ± 0,25	±	9,40 ± 0,93	±	24,6	110
448	111	6,65 ± 0,10	±	7,55 ± 0,26	–	15,8	70
1074	86	6,80 ± 0,04	+	9,05 ± 0,05	±	23,2	104
329	95	6,15 ± 0,15	–	9,40 ± 0,32	±	22,6	101
1062	99	6,40 ± 0,13	±	9,50 ± 0,37	±	24,0	108
371	42	6,45 ± 0,44	±	9,10 ± 0,65	±	22,2	99
Среднее – контроль	∑ = 1356	6,56 ± 0,03		8,96 ± 0,08		22,3	100

Примечание: $^{+}$ – достоверно лучше контроля при $\alpha_{0,05}$; $^{-}$ – достоверно хуже контроля при $\alpha_{0,05}$; $^{\pm}$ – достоверные отличия от контроля при $\alpha_{0,05}$ отсутствуют.

Таблица 2

Преимущество потомков лучших плюсовых деревьев сосны обыкновенной над потомками худших в испытательных культурах Петрозаводского центрального лесничества

№ поля	Возраст, лет	Средний объем стволов потомков 5 лучших плюсовых деревьев, м³ · 10⁻³	Средний объем стволов потомков 5 худших плюсовых деревьев, м³ · 10⁻³	Увеличение роста потомков лучших плюсовых деревьев по сравнению с худшими, %
12	17	26,0	11,3	230
13	17	18,3	7,5	244
10	19	28,0	19,4	144
В среднем	≈18			206

Исследование гибридного потомства осины

Осина является одной из лесообразующих пород в России. По занимаемой площади она стоит на 3–4-м месте, уступая лиственнице, сосне, ели, а в отдельных местах и березе. Древесина осины – лучшее сырье для спичечной промышленности, широко используется для изготовления фанеры, является ценным сырьем для ЦБП, идет на производство тары, применяется в химической промышленности при производстве полимеров, в топливном хозяйстве, а также в качестве кормовых добавок в животноводстве (веточный корм) и как лекарственное сырье. Несмотря на высокие технологические свойства и широкое применение осиновой древесины в народном хозяйстве, ее использование ограничено из-за массового (до 60–90 %) повреждения стволов (к возрасту спелости) сердцевинной гнилью, вызываемого грибом *Phellinus tremula* Bond. et Boris. (*Fomes igniarius* Fr.), и связанного с этим низкого выхода деловой древесины. Поэтому селекция осины в основном направлена на отбор устойчивых к фитопатогенам форм и выведение на их основе высокорезистентных гибридов. Селекцией осины в нашей стране занималась целая плеяда ученых (А. С. Яблоков, М. М. Вересин, С. П. Иванников, В. Т. Бакулин, Л. Е. Михайлов, Р. П. Царёва, В. П. Петрухнов и др.).

Результаты изучения гибридного потомства осины приведены в табл. 3. Как видно из данных, сохранность гибридного потомства осины, полученного В. П. Петрухновым, варьировала по семьям от 41,1 до 81,8 %, а в целом по участку составила 52,2 %. Средняя высота семей изменялась от 15,6 до 20,1 м, средний диаметр – от 18,4 до 28 см, объем ствола – от 0,25 до 0,60 м³, запас древесины с учетом сохранности – от 88 до 508 м³/га. Достоверно лучший рост гибридного потомства отмечался в 4 семьях: Осина X_2 × Осина ВГЛТА, Осина американская × Осина ВГЛТА, Осина обоянская × Тополь сереющий и у сложных гибридов из семьи Тополь Яблокова × Тополь сереющий. Средняя высота гибридов в отмеченных семьях в 29 лет составляла 18,5–20,1 м, средний диаметр – 24,3–28 см, средний объем ствола – 0,42–0,60 м³.

Наибольший запас древесины (508 м³/га) и самая высокая сохранность (80 %) в 29-летнем возрасте выявлены у гибридного потомства при скрещивании местных осин (Осина X_2 × Осина

ВГЛТА) – ранг 1. На втором и третьем месте по запасу древесины (ранг 2 и 3) находились семьи Осина американская × Тополь Болле и Осина американская × Осина ВГЛТА, то есть потомства гибридов, полученные при отдаленной гибридизации (331 и 267 м^3/га). Запас контрольного варианта в этом возрасте составил 171 м^3/га.

Таким образом, при использовании гибридной осины можно получать высокопродуктивные здоровые насаждения, превышающие контроль в 1,5–3 раза. Но самое главное, что при достаточно больших, а в ряде случаев даже рекордных запасах древесина осины в данном возрасте оставалась здоровой.

Произведенные расчеты показывают высокий экономический эффект получаемой древесины в искусственных насаждениях. Так, в октябре 2011– апреле 2012 года стоимость одного кубометра осиновой деловой древесины (круглый лес с доставкой) в Европейской России составляла 1100–1500 руб. [3], [7]. Учитывая, что затраты на создание гибридных и контрольных насаждений были примерно равными, примем одинаковую минимальную стоимость древесины в 1100 руб./м³ на участках гибридной осины и контроля. Стоимость древесины, получаемой с одного гектара леса в 29-летнем возрасте, составляла для гибридов 293,7–558,8 тыс. руб., тогда как на контрольном насаждении только 188,1 тыс. руб./га, то есть потенциальное превышение выручки при продаже леса с 1 га может составить 105,6–370,7 тыс. руб. в пользу гибридной осины. Это говорит о перспективности генетико-селекционных работ для повышения продуктивности насаждений для этой породы.

В целом результаты исследований показали фактическое положительное влияние на продуктивность создаваемых насаждений и высокую экономическую эффективность использования селекционно улучшенного и сортового материала. В экономически развитых странах это влияние стараются использовать при выращивании промышленных плантаций и большинства обычных лесных культур. В первую очередь это относится к быстрорастущим породам: тополь, ива, эвкалипт и др. Но в последние десятилетия эти подходы стали использоваться и при создании основных лесообразующих пород, таких как сосна обыкновенная, сосна скрученная, сосна Банкса и др. [11], [12], [14], [15], [16].

Таблица 3

Средние показатели роста гибридных семей осины на Семилукской коллекции в возрасте 29 лет

Гибридные семьи	Высажено, шт.	Сохранность, %	Показатели роста		Объем ствола, м^3		Площадь под семьей, м^2	Запас древесины, м^3/га	Ранг по запасу древесины
			Высота, м	Диаметр, м	м^3	ранг			
Ос. америк. × Ос. ВГЛТА	147	49,7	18,5	24,3	0,42	4	1150	267	3
Ос. Давида × Ос. ВГЛТА	168	41,1	16,8	21,2	0,29	8	1300	156	9
Ос. Давида × Т. Болле	89	44,9	16,3	20,3	0,26	10	810	129	10
Ос. X_1 × Ос. ВГЛТА	148	81,8	17,5	22,4	0,34	6	1550	266	4
Ос. X_2 × Ос. ВГЛТА	50	80,0	19,2	25,9	0,50	2	390	508	1
Ос. америк. × Т. Болле	32	43,8	18,0	23,3	0,38	5	160	331	2
Т. сереющий × Ос. ВГЛТА	150	43,3	17,0	21,6	0,31	7	1010	199	7
Т. Яблокова × Т. сереющий	60	46,7	18,6	24,3	0,42	3	580	204	6
Ос. Обоянская × Т. сереющий	40	42,5	20,1	28,0	0,60	1	460	223	5
Ос. ВГЛТА (полусибсы, контроль)	136	54,4	16,7	20,9	0,28	9	1230	171	8
Итого	1093	52,2							

ВЫВОДЫ

По результатам оценки продуктивности потомств плюсовых деревьев сосны обыкновенной, использование селекционно улучшенного материала, полученного даже в результате простых отборов, может значительно увеличить продуктивность создаваемых искусственных насаждений. Полевые эксперименты показали, что в равных условиях рост потомства сосны обыкновенной II класса возраста от лучших плюсовых деревьев может превышать рост потомств от худших деревьев в 2 раза. Средние показатели объема стволов потомств перспективных плюсовых деревьев превышали контроль на 17–114 %. Данные показатели, возможно, вызваны не только селекционным преимуществом потомств плюсовых деревьев, но и факторами среды, в связи с чем их следует рассматривать как предварительные. Использование гибридного посадочного материала осины позволило получить насаждения, в 2–3 раза превышающие запасы контрольных насаждений. Лучшие варианты гибридов осины показали рекордные запасы стволовой древесины для 3-го класса возраста (267–508 м^3/га в возрасте 29 лет), а получаемая в этом случае древесина была здоровой, не пораженной сердцевинной гнилью. Превышение стоимости стволовой круглой древесины на участках, созданных из лучших гибридов осины, может составить 106–371 тыс. руб. на одном гектаре в возрасте 29 лет. Представленные данные показывают экономическую эффективность использования затрат на генетико-селекционные исследования в лесном хозяйстве.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альбенский А. В. Селекция древесных пород и семеноводство. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1959. 306 с.
2. Вересин М. М. Селекционный отбор быстрорастущих форм древесных пород при лесовыращивании // Научные записки Воронежского лесохозяйственного института. Том IX. Воронеж: Воронежское областное книгоиздательство, 1946. С. 74–103.
3. Интернет-форумы лесной отрасли [Электронный ресурс]. Режим доступа: forums.wood.ru
4. Кобранов Н. П. Селекция дуба. М.: Новая деревня, 1925. 37 с.
5. Петрухнов В. П. Гибридизация осины в ЦЧО // Гибридизация лесных древесных пород: Сб. науч. тр. Воронеж: Центральный научно-исследовательский институт лесной генетики и селекции, 1988. С. 101–106.
6. Правдин Л. Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука, 1964. 191 с.
7. Продажа леса. ОАО «Альянс групп» [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.alliance-group.su
8. Снедекор Дж. У. Статистические методы в применении к исследованиям в сельском хозяйстве и биологии. М.: Изд-во сельскохозяйственной литературы, журналов и плакатов, 1961. 503 с.
9. Сукачев В. Н. Проблема преодоления времени в лесоводстве и роль селекции лесных древесных пород в ее разрешении // Селекция и интродукция быстрорастущих древесных пород. 1934. № 1. С. 15–25.
10. Тюрин А. В., Воропанов П. В., Науменко И. М. Лесная вспомогательная книжка (по таксации леса) / Под ред. А. В. Тюрина. 2-е изд. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1956. 532 с.
11. Царев А. П. Мировой опыт плантационного лесовыращивания // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 6 (111). С. 42–48.
12. Царев А. П., Царева Р. П., Царев В. А. Динамика сохранности и продуктивности настоящих тополей при испытании в условиях умеренного климата // Информационный вестник ВОГиС. 2010. Т. 14. № 2. С. 255–264.
13. Яблоков А. С. Селекция древесных пород. М.: Сельхозиздат, 1962. 487 с.
14. ABARE and Jaakko Pöyry. Global outlook for plantations. Canberra: Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics. ABARE project 1601, 1999. 99 p.
15. Carle J. (in cooperation with Andrade G., Lei Chen, Millanes M., Lungo A. D., Tetu P.). Synthesis of Country Progress Reports – Activities Related to Poplar and Willow Cultivation and Utilization, 2004 through 2007 // Poplars, Willows and People's Wellbeing. 23rd Session of International Poplar Commission Beijing, China, 27–30 October 2008.
16. Giertych M., Matyas C. Genetics of Scots Pine / Developments in Plant Genetics and Breeding 3. Amsterdam: Elsevier, 1991. P. 87–101.
17. Molotkov P. I., Patlaj I. N. Systematic position within the genus Pinus and intraspecific taxonomy // Genetics of Scots Pine / Developments in Plant Genetics and Breeding 3; Edited by M. Giertych and C. Matyas. Amsterdam: Elsevier, 1991. P. 31–40.

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Декабрь, № 8. Т. 2 **Технические науки** **2012**

УДК 631:363.4

ГЕННАДИЙ ИВАНОВИЧ МАЛИНОВ
доктор технических наук, профессор кафедры механизации сельскохозяйственного производства агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
malinov@psu.karelia.ru
ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ КОНДРАШОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры механизации сельскохозяйственного производства агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vkond@psu.karelia.ru
ТИММО АЛЕКСАНДРОВИЧ ГАВРИЛОВ
аспирант кафедры механизации сельскохозяйственного производства агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
gavrilov@psu.karelia.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ЛЕЗВИЯ В ПРОЦЕССЕ ОПОРНОГО РЕЗАНИЯ*

Определены углы трения различных кормов животного происхождения о металлическую пластину. Проведен анализ условий, способствующих измельчению кормов и уменьшению энергозатрат. Для этих условий получены значения угла скольжения, общие для ряда исследуемых кормов.

Ключевые слова: угол защемления, угол трения, уменьшение энергозатрат, корма животного происхождения

ВВЕДЕНИЕ

Процесс резания по своей роли в технологии приготовления кормов животного происхождения, а также по доле энергозатрат является одним из наиболее значимых. На этот процесс во всем мире расходуется до 50 % электроэнергии, затрачиваемой на приготовление кормов, причем большая часть электроэнергии расходуется непроизвольно и нерационально: превращается в тепло и другие виды энергии [1]. Вследствие этого весьма актуальным становится изучение наиболее значимых параметров процесса резания. Одним из таких параметров считается угол скольжения лезвия ножа τ [3], [4], [6], [8]. Данный угол заключен между направлением движения рассматриваемой точки лезвия и нормалью к лезвию и может принимать значения в очень широком интервале: $0° \leq \tau \leq 90°$. Вместе с тем не на всем интервале значений угол скольжения способствует осуществлению процесса резания и уменьшению энергозатрат. Вследствие этого возникает необходимость определить из указанного интервала значения угла скольжения, которые способствуют осуществлению процесса резания и уменьшению энергозатрат, что и явилось целью настоящей работы.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В. А. Желиговский [4] экспериментально установил, что в зависимости от величины угла скольжения можно выделить три вида резания: нормальное, наклонное и скользящее. Причем при использовании скользящего резания происходит уменьшение энергозатрат вследствие снижения нормального усилия за счет кинематической трансформации угла заточки, переноса части силы трения с нормального на тангенсальное направление, кинематической трансформации кромки лезвия и пилящего воздействия кромки. Вид скользящего резания осуществляется при условии:

$$\tau \geq \varphi. \tag{1}$$

Данные В. А. Желиговского подтверждаются результатами исследований [2], [7], выявившими снижение энергозатрат на процесс резания и уменьшение нормального усилия резания при увеличении угла скольжения лезвия.

В. П. Горячкин [3] в ходе исследования процесса опорного резания установил, что для того чтобы материал в процессе опорного резания удерживался между лезвиями и не выскальзывал, необходимо, чтобы угол защемления χ был равен или меньше двойного угла трения:

$$\chi \leq 2\varphi. \tag{2}$$

Кроме того, угол защемления χ равняется сумме углов наклона лезвия ножа τ и лезвия противорежущей пластины $\tau_п$:

$$\chi = \tau + \tau_п. \tag{3}$$

В большинстве современных машин для измельчения кормов лезвие противорежущей пластины устанавливают под углом наклона 0° [5], то есть $\tau_п = 0$. Учитывая это обстоятельство и выражение (3), неравенство (2) можно переписать в виде:

$$\tau \leq 2\varphi. \tag{4}$$

На основе представленных выше результатов исследований В. А. Желиговского и В. П. Горячкина, а также полученных выражений (1) и (4) нами были получены значения угла скольжения, способствующие осуществлению процесса резания и уменьшению энергозатрат, определяющиеся из интервала:

$$\varphi \le \tau \le 2\varphi. \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет определить значения углов скольжения различных кормов животного происхождения, способствующих осуществлению процесса резания и уменьшению энергозатрат. Для этого необходимо знать углы трения этих кормов о материал ножа и противорежущей пластины.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследование коэффициентов трения скольжения различных кормов животного происхождения проводилось на установке для измерения коэффициентов трения пищевых продуктов (рис. 1), конструкция подобной установки и методика эксперимента ранее описывались в литературе [9]. В качестве исследуемого материала использовались корма животного происхождения из базового рациона кормления пушных зверей: атлантическая сельдь, минтай, мясо свинины, голень куриная, печень свиная, кость свиная. Исследуемые корма животного происхождения имели следующие характеристики: влажность 72…75 %, температура 273…278 К. В качестве поверхности трения использовалась стальная пластина.

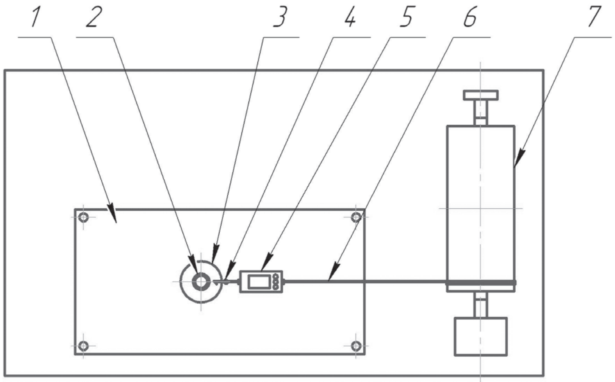


Рис. 1. Схема установки для определения коэффициента трения: 1 – стальная пластина, 2 – пластина-утяжелитель, 3 – куски исследуемого материала, 4 – крюк, 5 – электронный динамометр, 6 – трос, 7 – мотор-барабан марки МБ-1,6

Исследуемые корма животного происхождения предварительно разрезались на куски 3 одинакового размера 40 × 60 мм, взвешивались и укладывались на стальную пластину 1 плоскостью разреза вниз (так как в процессе резания нож взаимодействует с материалом по поверхности среза, в процессе резания из материала выделяется клеточный сок, кровь и другие жидкости, влияющие на коэффициент трения). Сверху на куски устанавливалась пластина-утяжелитель 2 массой 0,5 кг с целью обеспечения давления контакта трущихся поверхностей (так как в процессе резания измельчаемый материал обжимает боковые грани лезвия ножа, создавая тем самым давление контакта трущихся поверхностей). Куски исследуемого материала посредством крюка 4 и троса 6 последовательно соединялись с электронным динамометром 5 типа ВВ и мотор-барабаном 7 марки МБ-1,6, который приводил их в движение, обеспечивая постоянную скорость скольжения 0,25 м/с. Электронный динамометр с ценой деления 0,001 кг автоматически фиксировал на дисплее значение силы трения скольжения при установившемся движении кусков материала. Измерение силы трения скольжения проводилось для всех исследуемых материалов по 100 повторностей. В процессе измерений получены выборки случайных величин сил трения скольжения $F_{\text{трi}}$. По значениям сил трения скольжения были рассчитаны углы трения скольжения φ_{i} по формуле:

$$\varphi_{\text{i}} = \operatorname{arctg}(F_{\text{трi}} / m_{\text{i}} * g).$$

Для них произведена статистическая обработка для доверительной вероятности 0,7, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Углы трения скольжения различных кормов животного происхождения, градусы

Показатель	Печень свиная	Сельдь атлантическая	Кость свиная	Минтай	Голень куриная	Мясо свиное
Среднее значение угла трения скольжения	6,21	10,14	10,43	12,76	8,89	12,12
Среднеквадратичное отклонение	1,19	9,02	2,11	1,48	1,19	2,09
Доверительный интервал	0,31	2,38	0,56	0,39	0,31	0,55
Верхняя граница доверительного интервала	6,52	12,52	10,98	13,15	9,20	12,67
Нижняя граница доверительного интервала	5,89	7,76	9,87	12,37	8,57	11,57

Полученные значения углов трения были подставлены в выражение (5). В качестве минимального значения угла скольжения в выражении (5) были подставлены значения нижней границы доверительного интервала угла трения, в качестве максимального значения угла скольжения были подставлены удвоенные значения верхней границы доверительного интервала угла трения, результаты подстановки представлены в табл. 2.

Полученные значения минимальных и максимальных углов скольжения различных кормов животного происхождения были представлены в виде диаграммы (рис. 2).

Таблица 2

Углы скольжения различных кормов животного происхождения, градусы

Показатель	Печень свиная	Сельдь атлантическая	Кость свиная	Минтай	Голень куриная	Мясо свиное
Минимальный угол скольжения	5,89	7,76	8,57	9,87	11,57	12,37
Максимальный угол скольжения	13,05	15,52	17,14	19,75	23,15	26,31

Анализируя рис. 2, можно выделить зону перекрытия углов скольжения (выделены горизонтальными жирными линиями), в которой находятся углы скольжения, совпадающие для всей совокупности исследуемых кормов. Эта зона составляет интервал $12{,}37 \le \tau \le 13{,}05$.

Полученные результаты подтверждают экспериментальные исследования [7], в которых установлено, что при измельчении кормов работа резания уменьшается при углах скольжения от 10 до 40°, при дальнейшем увеличении угла скольжения работа резания возрастает.

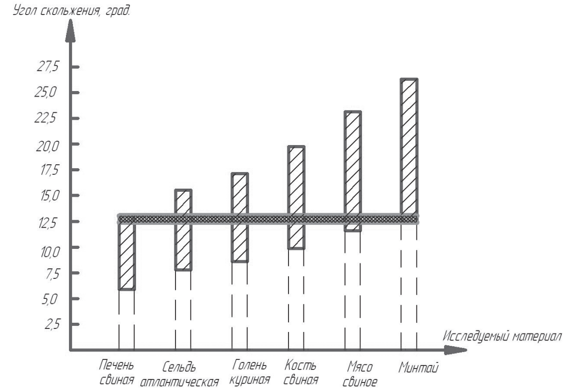


Рис. 2. Диаграмма углов скольжения различных кормов животного происхождения

ВЫВОДЫ

В результате данной работы было получено выражение для определения значений угла скольжения лезвия ножа, которые способствуют осуществлению процесса опорного резания и уменьшению его энергозатрат: $\varphi \le \tau \le 2\varphi$. Также определен интервал значений угла скольжения лезвия ножа, общий для ряда исследованных кормов животного происхождения, способствующий осуществлению процесса опорного резания и уменьшению его энергозатрат: $12{,}37 \le \tau \le 13{,}05$.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсов Н. А. Ресурсосберегающие технологические процессы и технические средства переработки мясокостных кормов в звероводстве: Автореф. дис. … д-ра техн. наук. СПб., 1992. 607 с.
2. Гаврилов Т. А., Малинов Г. И. Экспериментальное исследование процесса резания мясо-рыбных кормов // Материалы I Международной заочной научно-практической конференции. Устойчивое развитие АПК: рациональное природопользование и инновации. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. С. 95–97.
3. Горячкин В. П. Собр. соч. Т. 3. М.: Колос, 1965.
4. Желиговский В. А. Экспериментальная теория резания лезвием // Труды МИМЭСХ. Вып. 9. М., 1940.
5. Кузьмин В. В. Совершенствование процесса резания мясного сырья на основе математического моделирования формы режущих инструментов: Автореф. дис. … канд. техн. наук. СПб., 2009.
6. Курдюмов В. И., Аюгин П. Н., Аюгин Н. П. Анализ факторов, влияющих на энергоемкость резания // Нива Поволжья. 2008. № 3. С. 57–59.
7. Курдюмов В. И., Аюгин П. Н., Аюгин Н. П. Снижение энергоемкости измельчения // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2008. № 5. С. 50–53.
8. Резник Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. С. 29–32.
9. Шаманаева Е. А., Бурыка П. С. Исследование коэффициента трения говядины и баранины по поверхностям из различных материалов // Материалы XXXVIII научно-технической конференции по итогам работы профессорско-преподавательского состава СевКавГТУ за 2008 год. Том первый. Естественные и точные науки. Технические и прикладные науки. Ставрополь: СевКавГТУ, 2009. С. 216–218.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Технические науки** **2012**

УДК 621.565.59

ИГОРЬ КОНСТАНТИНОВИЧ САВИН
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой энергообеспечения предприятий и энергосбережения физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
savin@psu.karelia.ru

ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА ЗАВАРКИНА
преподаватель кафедры энергообеспечения предприятий и энергосбережения физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
zavarkina@psu.karelia.ru

РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСА ОХЛАЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЕСТЕСТВЕННОГО ХОЛОДА С ЦИКЛОМ ЭГД-ИКС*

Рассматривается возможность использования естественного холода. Предложен технический способ, позволяющий поддерживать требуемый режим работы в экологически чистых и энергосберегающих системах охлаждения.

Ключевые слова: естественный холод, электрогидродинамическая система, испарительно-конденсационная система

Повышение энергоемкости производства ведет к экологической напряженности и увеличению стоимости топливно-энергетических ресурсов, что, в свою очередь, выявляет необходимость поиска альтернативных источников энергии. Сжигание углеводородов для производства электроэнергии увеличивает потенциал глобального потепления, так как образующийся при их сжигании углекислый газ, выбрасываемый в атмосферу, увеличивает парниковый эффект.

Применяемые в настоящее время источники энергии, как правило, используют в качестве топлива невозобновляемые ресурсы, при этом возобновляемые источники энергии требуют значительной проработки для более широкого их применения.

В последние годы заметно увеличился интерес к научным разработкам, позволяющим использовать принципиально иные источники энергии, в том числе энергию естественного холода. Использование холодильных машин для агропромышленного комплекса при переработке и хранении сельскохозяйственной продукции требует постоянного увеличения энергопотребления. При этом охлаждение молока естественным холодом является распространенным направлением не только в научно-исследовательских работах, но и при производстве холодильной техники для аграриев России.

Использование естественного льда в качестве источника холода объясняется его ценными физическими свойствами: низкой температурой таяния (0 °С) и высокой теплотой плавления, равной в обычных условиях 335 кДж/кг. При таянии 1 кг льда из окружающей среды расходуется 335 кДж теплоты. Теплопроводность льда в интервале температур 0...-20 °С составляет 2,33 Вт/(м · К), а удельная теплоемкость – 2,12 кДж/(кг · К) [2].

Холод природной среды применяется при разных температурах для теплоэнергетических и холодильных целей. Непосредственное или аккумуляционное охлаждение природной средой не требует, в отличие от искусственного охлаждения, затрат энергии на получение холода.

При этом существующие ледники имеют явно выраженные недостатки, разработанные конструкции холодильных установок с использованием естественного холода не нашли широкого применения на практике.

Эффективность охлаждения естественным холодом зависит от климатических условий конкретного региона. Так, холодная зона с морозными зимами обеспечивает непосредственное естественное охлаждение продукта, аккумуляцию холода в грунте и получение льда. Замораживание и охлаждение грунта также целесообразно для создания подземных аккумуляторов холода, используемых в летнее время для продуктовых складов холодильников. Карелия перспективна в плане использования холода наружного воздуха и природного льда для переработки и хранения овощной продукции.

Данная система эффективна в областях, где индекс холода больше 400 °С в сутки и относительно высокая (20 °С) температура окружающего воздуха в теплое время года.

Индекс холода вычисляется по формуле:

$$M = \Sigma\,(T_i \times D_i), \qquad (1)$$

где T_i – суточная температура окружающего воздуха в зимний период, °С; D_i – количество дней в году с температурой ниже 0 °С.

Количество теплоты, передаваемой при помощи тепловой трубы, можно определить по формуле:

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{fa} + R_{hp} + R_{hs}}, \quad (2)$$

где ΔT – разность температур между теплоаккумулирующим веществом и атмосферой, °C; R_{fa} – термическое сопротивление между конденсатором и атмосферой, (м^2 × К)/Вт; R_{hp} – термическое сопротивление тепловой трубы, (м^2 × К)/Вт; R_{hs} – термическое сопротивление между испарителем и теплоаккумулирующим веществом, (м^2 × К)/Вт.

$$R_{hp} = \frac{1}{\alpha_c \times A_c} + \frac{1}{\alpha_p \times Ae},$$

$$R_{hs} = \frac{1}{2 \times \pi \times \lambda_g \times L_c \times \ln(d_g / d_{hp})},$$

где α_c – коэффициент теплоотдачи между окружающим воздухом и конденсатором; Вт/м^2; A_c – площадь теплоотдающей поверхности конденсатора, м^2; A_e – площадь соприкосновения (испарителя) и тепловой трубы, м^2; L_c – длина конденсатора, м; d_g – диаметр замораживаемого теплоаккумулирующего вещества, м; d_{hp}– диаметр тепловой трубы, м.

Термическое сопротивление между конденсатором и атмосферой может быть определено по формуле:

$$R_{fa} = \frac{1}{\alpha_c \times A_f}, \quad (3)$$

где A_f – внешняя площадь конденсатора; α_c – коэффициент теплоотдачи материала стенки трубы, Вт/(м^2 × ^{0}С).

В результате была рассчитана тепловая труба мощностью 300 Вт, обеспечивающая (при разнице температур между конденсатором и испарителем 3 °С) заморозку двухметрового слоя теплоаккумулирующего вещества. Термическое сопротивление тепловой трубы составляло 0,01 (м^2 × К)/Вт, а температура на испарителе -5 °С.

Японскими учеными была построена экспериментальная установка аккумулирования холода, которая состояла из 216 тепловых труб диаметром 46 мм каждая, длиной 12 м, с интервалом 0,5 м в четыре ряда вокруг охлаждаемого объекта, для зарядки предлагается использовать испарительно-конденсационные системы [5].

В камеру загружено около 7 т сельскохозяйственных продуктов. Данные исследований снимались, когда теплоаккумулирующее вещество было заморожено (конец января). В качестве рабочей жидкости был выбран фреон R-22.

Комплекс работает следующим образом. При понижении температуры наружного воздуха ниже температуры теплоаккумулирующего вещества тепловые трубы начинают передавать тепло от теплоаккумулирующего вещества через радиатор конденсатора в атмосферу. Таким образом происходит зарядка теплового аккумулятора.

Когда температура окружающего воздуха по каким-либо причинам становится выше температуры теплоаккумулирующего вещества, тепловая труба выключается. Таким образом исключается отвод теплоты от теплоаккумулирующего вещества в атмосферу и проникновение теплоты от окружающего воздуха внутрь аккумулятора [2].

Исследования велись около года и позволили сделать следующие выводы:

- аккумулирование «естественного» холода с применением тепловых труб технически возможно;
- при любых изменениях погоды возможно поддержание стабильной температуры в охлаждаемом помещении.

Однако комплекс имеет ряд недостатков. Например, охлаждение воздуха в помещении происходит непосредственно через стенку этого помещения, усложняя процесс поддержания постоянной температуры внутри него. Кроме того, имеется сложность загрузки помещения, поскольку оно находится под землей.

Важным критерием работы холодильной установки является температура объекта, которая поддерживается постоянной независимо от изменения мощности тепловыделения, иными словами, система термостатирования должна обеспечивать регулирование теплопередачи в широких пределах.

Решение задачи возможно благодаря электрогидродинамическим испарительно-конденсационным системам (ЭГД-ИКС). Теплообменные устройства, в которых реализован замкнутый испарительно-конденсационный цикл, электрическое поле используются для интенсификации или управления тепломассообменными процессами, как на отдельных участках системы, так и в любом их сочетании [1], [2].

Одним из важнейших процессов в данной системе является зарядка аккумулятора, по этой причине нами было принято решение о более тщательном изучении данного процесса. Для этого мы предприняли попытку построения физической модели теплового аккумулятора и изучения процесса его последующей зарядки в лабораторных условиях, в дальнейшем необходимо разработать конструкторские решения, которые воплотятся в промышленный образец.

Цикл работы охлаждаемой камеры позволяет теплоту от воздуха охлаждаемой камеры передать тепловому аккумулятору порциями посредством ЭГД-ИКС [3], [4].

В отличие от термосифона, в электрогидродинамической испарительно-конденсационной системе зона испарения находится выше зоны конденсации, поэтому для обеспечения ее работоспособности необходимо, чтобы жидкий теплоноситель из зоны конденсации поступал в зону испарения. Этот процесс осуществляется с помощью электрогидродинамического насоса по конденсатопроводу. Вся поверхность зоны испарения равномерно смачивается жидкостью, так как она имеет капиллярную структуру.

Электрогидродинамический насос позволяет легко регулировать расход теплоносителя в широких пределах от непрерывной подачи до полного прекращения, строго контролируя тепловой поток от охлаждаемой камеры к тепловому аккумулятору и тем самым поддерживая требуемый режим работы системы охлаждения в целом.

При дальнейшем совершенствовании конструкции холодильной установки с использованием наружного холодного воздуха она может быть использована при создании низкопотенциальной холодильной установки с циклом ЭГД-ИКС, способной конкурировать с традиционными холодильными установками аграрного сектора экономики.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болога М. К., Савин И. К. Электрогидродинамические испарительно-конденсационные системы. Кишинев: Штиинца, 1991. 277 с.
2. Савин И. К. Возможности использования природного холода // Вестник Международной академии холода. 1998. Вып. 1. С. 9–10.
3. Савин И. К., Нефёдов Д. В., Заваркина Е. А. Комплекс охлаждения с использованием естественного холода с применением системы ЭГД-ИКС // Вестник Международной академии холода. 2010. № 4. С. 13–18.
4. Savin I. K., Nefedov D. V. Opportunities of the natural cold application // Тезисы докладов 4-й Минской международной конференции «Тепловые трубы, тепловые полосы, холодильники». Минск, 2000. С. 229–230.
5. Fukuda M., Tsuchiya F., Ryokai K., Mochizuki M., Mashiko K. Development of artificial permafrost storage using Heat Pipes // The 3rd International Heat Pipe Symposium. Tsukuda. Sept. 1988. P. 285–289.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Технические науки** **2012**

УДК 630*232.322.5

АНДРЕЙ ВИКТОРОВИЧ РОДИОНОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры механизации сельскохозяйственного производства агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
andrey.rodionov@mail.ru
АЛЕКСАНДР МАКСИМОВИЧ ЦЫПУК
доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
tsypouk@mail.ru
ОЛЕГ БОРИСОВИЧ МАРКОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
markov@psu.karelia.ru
АНАТОЛИЙ ЭВАЛЬДОВИЧ ЭГИПТИ
кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
evald@psu.karelia.ru

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ЛУНКООБРАЗОВАТЕЛЯ*

Представлены перспективные направления совершенствования конструкции динамического лункообразователя типа Л-2У для посадки леса.

Ключевые слова: динамический лункобразователь, совершенствование, посадка леса

Для механизации подготовки лунок для посадки растений при восстановлении леса на нераскорчеванных вырубках с каменистыми почвами в Петрозаводском университете разработан динамический лункообразователь типа Л-2У [5]. Теоретическое обоснование проектных параметров для опытных образцов и опытных партий динамических лункообразователей типа Л-2У выполнено в работах [1], [2], [3], [4], [5], однако при переходе от испытаний к производственной эксплуатации возникли как непредвиденные поломки при взаимодействии с препятствиями (удары о камни, пни) на вырубках, так и ряд новых идей по расширению функциональных возможностей машины. В настоящее время исследовательские работы рекомендуется вести в следующих основных направлениях: 1. Анализ нагруженности основных рабочих органов лункообразователя типа Л-2У при работе в среде препятствий (пни, камни) на вырубке с целью научного обоснования коэффициентов динамичности, необходимых для проектных и конструкторских работ при создании и совершенствовании машины. 2. Обоснование размеров, формы и типа поперечного сечения основных рабочих органов лункообразователя типа Л-2У, обеспечивающих минимальную металлоемкость конструкции при заданных параметрах нагружения машины при работе в среде препятствий. 3. Расширение технологических возможностей лункообразователя типа Л-2У путем обоснования проектных параметров рабочих органов и приспособлений, обеспечивающих подготовку почвы и посев семян.

В рамках исследований по первому направлению были выполнены исследования нагруженности рабочих органов машины при работе в среде препятствий на вырубке [1], [2], [3], [4], также была разработана новая методика [2], [4] моделирования соударения элементов лункообразователя типа Л-2У с препятствиями на вырубке, развивающая ранее выполненные исследования [1], [5]. Установлено (рис. 1, 2), что при ударе иглой на конце рычага Л-2У (наиболее опасная ситуация) о камень коэффициент динамичности равен $k_{din} = 465$, напряжение изгиба $\sigma = 275{,}9$ МПа, что больше допускаемого напряжения на изгиб углеродистой стали 5 (200 МПа), но меньше, чем предел ее прочности $\sigma_B = 500…620$ МПа (для легированных сталей $\sigma_B = 800…1000$ МПа) [6]. При ударе иглой на конце рычага Л-2У о минеральную почву коэффициент динамичности равен $k_{din} = 22$, напряжение изгиба $\sigma = 12{,}8$ МПа, что не превышает допускаемое напряжение на изгиб углеродистой стали 5 (200 МПа) [6].

Коэффициент перегрузки материала рычага (определяется как отношение коэффициента динамичности при соударении иглы на конце рычага с камнем к аналогичному коэффициенту при соударении с почвой) составляет $k_{пер} = 21$. В перспективном варианте конструкции модернизированного динамического лункообразователя типа Л-2М (патенты РФ № 56 766, № 75 910) предусмотрен одноплечий рычаг, то есть без хвостовой части (рис. 4). В этом случае длина рычага равна 1,26 м. Другие характеристики рычага остаются без изменений по сравнению с Л-2У. В результате расчетов для двух аналогичных ситуаций соударения рабочего органа перспективного лункообразователя установлено, что при ударе иглой на конце рычага Л-2М о камень коэффициент динамичности равен $k_{din} = 191$, напряжение изгиба $\sigma = 187{,}8$ МПа, что не превышает допускаемого напряжения на изгиб углеродистой стали 5 (200 МПа) и меньше, чем предел ее прочности $\sigma_B = 500…620$ МПа [6]. При ударе иглой на конце рычага Л-2М о минеральную почву коэффициент динамичности равен $k_{din} = 49$, напряжение изгиба $\sigma = 49{,}7$ МПа, что не превышает допускаемое напряжение на изгиб углеродистой стали 5 (200 МПа) [6]. Коэффициент перегрузки материала рычага составляет $k_{пер} = 4$, что значительно ниже, чем в случае лункообразователя типа Л-2У.

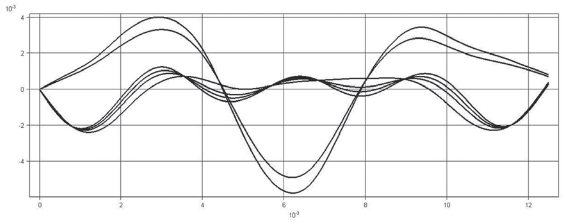


Рис. 1. Зависимость перемещений точек хвостовой (короткие) и передней (длинные волны) частей рычага от времени при соударении иглы с камнем. По оси ординат – перемещение в метрах, по оси абсцисс – время в секундах

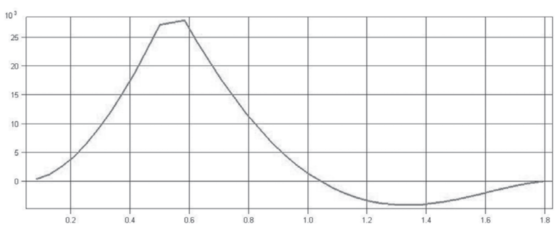


Рис. 2. Изменение величины изгибающего момента по длине рычага при соударении иглы с камнем. По оси ординат – величина момента в ньютон-метрах, по оси абсцисс – расстояние от левого торца хвостовой части рычага в метрах; $M_{max} = 27917{,}5$ Н · м

В рамках исследований по второму направлению были выполнены исследования по обоснованию наилучшего профиля поперечного сечения основного рабочего органа динамического лункообразователя – рычага с шарнирно закрепленной на его конце иглой – по критерию минимальной металлоемкости [3]. По конструктивным соображениям рычаг лункообразователя Л-2У изготавливается как двуплечий, коробчатого сечения, сварной из двух швеллеров № 12 (по ГОСТ 8240-97), материал сталь 5 (рис 3 *а*) [5]. Для сравнения с имеющейся формой профиля поперечного сечения рычага были выбраны следующие предпочтительные с конструктивной точки зрения формы полых поперечных сечений (рис. 3 *б*, *в*, *г*, *д*): квадратная, прямоугольная, круглая и овальная.

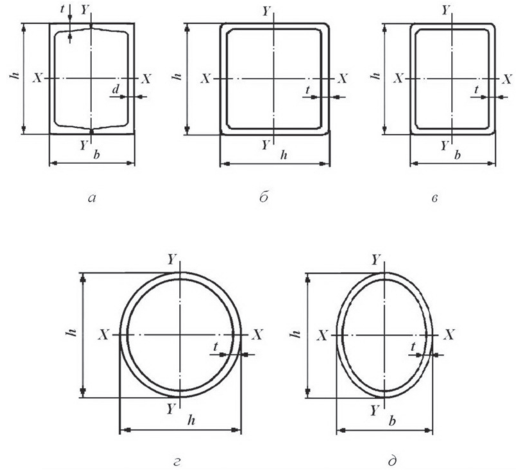


Рис. 3. Формы полых поперечных сечений рычага: *а* – коробчатое из двух швеллеров; *б* – квадратное; *в* – прямоугольное; *г* – круглое; *д* – овальное; *h* – высота сечения, м; *b* – ширина сечения, м; *d*, *t* – толщина стенки сечения, м

Результаты сравнения сечений рычага

Сравнение по моменту инерции						
№	h, м	b, м	J_X, м⁴	d, м	t, м	$m_П$, кг/м
а	0,12	0,104	$608 \cdot 10^{-8}$	0,0048	0,0078	20,80
б	0,12	–	$608 \cdot 10^{-8}$	–	0,0062	22,06
в	0,12	0,104	$608 \cdot 10^{-8}$	–	0,0071	23,28
г	0,12	–	$608 \cdot 10^{-8}$	–	0,0122	32,48
д	0,12	0,104	$608 \cdot 10^{-8}$	–	0,0147	35,22
Сравнение по моменту сопротивления						
№	h, м	b, м	W_X, м³	d, м	t, м	$m_П$, кг/м
а	0,12	0,104	$101 \cdot 10^{-6}$	0,0048	0,0078	20,80
б	0,12	–	$101 \cdot 10^{-6}$	–	0,0081	28,39
в	0,12	0,104	$101 \cdot 10^{-6}$	–	0,0091	29,39
г	0,12	–	$101 \cdot 10^{-6}$	–	0,0157	40,38
д	0,12	0,104	$101 \cdot 10^{-6}$	–	0,0184	42,47
Сравнение по полярному моменту сопротивления						
№	h, м	b, м	W_P, м³	d, м	t, м	$m_П$, кг/м
а	0,12	0,104	$84 \cdot 10^{-6}$	0,0048	0,0078	20,80
б	0,12	–	$84 \cdot 10^{-6}$	–	0,0051	18,51
в	0,12	0,104	$84 \cdot 10^{-6}$	–	0,0091	29,39
г	0,12	–	$84 \cdot 10^{-6}$	–	0,0055	15,45
д	0,12	0,104	$84 \cdot 10^{-6}$	–	0,0061	15,93

Примечание. h – высота сечения, м; b – ширина сечения, м; d, t – толщина стенки сечения, м; J_X – момент инерции сечения, м⁴; W_X – момент сопротивления сечения, м³; W_P – полярный момент сопротивления сечения, м³; $m_П$ – погонная масса рычага, кг/м

Результаты сравнения представлены в таблице (нумерация профилей поперечных сечений принята по рис. 3). Установлено, что наилучшим образом сопротивляется изгибам во всех направлениях поперечное сечение, профиль которого сформирован из двух швеллеров № 12 с уклоном внутренних полок (по ГОСТ 8240-97). Квадратный полый профиль поперечного сечения можно рекомендовать для тех случаев, когда изготовление рычага из двух швеллеров представляется нецелесообразным. Дальнейшие исследования в этой области рекомендуется вести в направлении подбора стандартных конструктивных элементов для профиля сечения с помощью комплексов специальных программ для ПЭВМ типа «SCAD Office», «ЛИРА» и др., а также изучить перспективы изготовления рычага из профиля нестандартного сечения.

В рамках исследований по третьему направлению были разработаны два варианта высевающего устройства к лункообразователю: механическое [1], [2] и более совершенное – пневматическое (рис. 4).

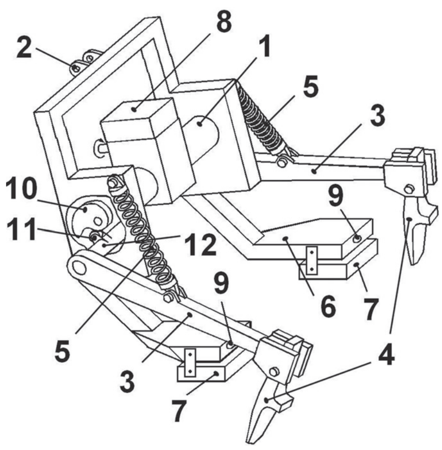


Рис. 4. Лункообразователь типа Л-2М с установленным пневматическим высевающим приспособлением

Механическое высевающее устройство является сменным приспособлением к лункообразователю Л-2У, устанавливаемым вместо игл. Приспособление предназначено для строчно-луночного посева мелких сыпучих семян (преимущественно хвойных древесных пород) по минерализованным полосам одновременно с обработкой почвы. Лункообразователь типа Л-2М с пневматическим высевающим приспособлением содержит (рис. 4): остов (1), навесное устройство (2) для соединения с трактором (трактор не показан), по бокам остова смонтированы рычаги (3) с шарнирными иглами (4), регуляторы энергии в виде пружин сжатия (5), лыжеобразные полозы (6), оснащенные снизу устройствами для поверхностной обработки почвы (7), на остове также смонтировано устройство для выделения порций семян с воздухонагнетателем (8), внутри остова проложены семяпроводы (не показаны), заканчивающиеся выходными окнами (9) на лыжеобразных полозах. Лункообразователь типа Л-2М с пневматическим высевающим приспособлением без дополнительной переналадки режимов работы обеспечивает подготовку ямок для посадки растений, посев семян или поверхностную обработку почвы для восстановления леса на вырубках. В настоящее время коллективом авторов ведутся исследовательские и опытно-конструкторские работы по обоснованию проектных параметров лункообразователей типа Л-2У и Л-2М, оснащенных высевающими приспособлениями, а также разработка технологий их рационального применения на вырубках в среде препятствий.

ВЫВОДЫ

1. Динамический лункообразователь типа Л-2У со сменными высевающими приспособлениями позволяет механизировать трудоемкие работы по подготовке почвы для посадки растений, посев лесных семян и содействует естественному лесовозобновлению.
2. Представленные в статье направления исследований и уже достигнутые результаты позволяют успешно завершить работы по созданию эффективной, универсальной машины для лесовосстановления на основе динамического лункообразователя типа Л-2У, работоспособной в среде препятствий (пни, камни) на вырубках.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков О. Б. Обоснование параметров рычажно-кулачкового механизма динамического лункообразователя для посадки лесных культур: Дис. … канд. техн. наук. Петрозаводск, 2006. 163 с.
2. Родионов А. В. Рубка и восстановление леса на основе ресурсосберегающей технологии. М.: Флинта, 2006. 276 с.
3. Родионов А. В. Выбор поперечного сечения рычага динамического лункообразователя для посадки леса. Петрозаводск, 2008. 23 с. Деп. в ВИНИТИ 29.10.2008, № 828-В2008.
4. Родионов А. В., Раковская М. И., Колесников Г. Н. Моделирование балочного элемента лесопосадочной машины как упругой механической системы с распределенной массой при соударениях // Вестник Поморского университета. 2006. № 4. С. 148–155.
5. Цыпук А. М. Повышение эффективности лесовосстановительных работ ресурсосберегающей технологией: Дис. … д-ра техн. наук. СПб., 1996. 299 с.
6. Фесик С. П. Справочник по сопротивлению материалов. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Будівельник, 1982. 280 с.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Технические науки** **2012**

УДК 630.31

ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ СУХАНОВ
преподаватель кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
yurii_ptz@bk.ru
АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ СЕЛИВЕРСТОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
alexander@psu.karelia.ru
АНТОН ПАВЛОВИЧ СОКОЛОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
a_sokolov@psu.karelia.ru
ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ СЮНЁВ
доктор технических наук, профессор, проректор по научно-исследовательской работе, заведующий кафедрой тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
siounev@psu.karelia.ru

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ХАРВЕСТЕРА: АЛГОРИТМЫ И РЕАЛИЗАЦИЯ*

В статье приводится краткое описание алгоритмов работы колесных и гусеничных харвестеров и особенностей их программной реализации.

Ключевые слова: сортиментная технология, харвестер, имитационное моделирование

Проведение имитационных экспериментов с компьютерными моделями, учитывающими особенности машин и природно-производственных условий, помогает решать проблемы оптимального выбора техники для проведения промышленных лесозаготовок или рубок ухода за лесом. Методикой моделирования операций лесных машин, оснащенных манипулятором, занимались в СПбГЛТУ им. С. М. Кирова [5]. Проблемы расчета производительности операций лесосечных работ изучали в Сибирском федеральном университете [6]. В Петрозаводском государственном университете были проведены значительные работы по созданию моделей лесозаготовительных машин [1], [2], [3]. Модели создавались с помощью методов имитационного моделирования, ГИС-технологий и системы управления базами данных. Проводились работы по созданию моделей процессов заготовки древесины комплексами машин с использованием теории очередей [4].

На лесоинженерном факультете в сотрудничестве с НИИ леса Финляндии METLA и в соответствии с Программой стратегического развития ПетрГУ проводятся исследования операций лесозаготовительных машин в рамках проектов «Технико-экономическая и эколого-социальная оценка перспективности заготовки древесной биомассы для нужд местной энергетики с использованием логистического подхода и ГИС-технологий», «Новые трансграничные решения в области интенсификации ведения лесного хозяйства и повышения степени использования топливной древесины в энергетике».

Модель позволяет имитировать работу специализированных лесосечных машин (колесных харвестеров) и переоборудованной для работы в лесу дорожно-строительной техники (харвестеров на базе гусеничных экскаваторов). Исходными данными для работы модели являются характеристики сгенерированной модельной делянки и характеристики имитируемой лесозаготовительной машины.

Для моделирования работы машины в цикле выполняются три подпрограммы: определения следующей технологической стоянки; движения; валки и обработки деревьев.

При моделировании расположение машины в пространстве характеризуется двумя координатами и углом между продольной осью машины и осью координат. Машина движется по оси технологического коридора, валит и обрабатывает назначенные в рубку деревья. В модели реализованы проверки возможности наведения манипулятора и захвата дерева, а также проверки на возможное опрокидывание машины.

Если дерево прошло все проверки, то оно назначается в валку. При моделировании производится учет повреждений оставляемым на доращивание деревьям, нанесенных им в ходе работы лесной машины:

- повреждение кроны и ствола при наведении манипулятора;
- повреждения при валке дерева;
- повреждения при подтаскивании дерева;
- повреждения при обработке дерева.

После того как произведен расчет временных затрат по операциям валки, обрезки сучьев и раскряжевки, отмечаем дерево как поваленное.

При моделировании учитывается:

- время на наведение и доставку харвестерной головки к дереву;
- время на зажим дерева рычагами;
- время на валку дерева;
- время на обрезку сучьев и время раскряжевки ствола;
- время на перемещение порубочных остатков.

Также на каждой технологической стоянке учитываются временные промежутки на перевод манипулятора из транспортного положения в рабочее и из рабочего в транспортное.

Данные о полученных сортиментах и порубочных остатках включаются в специальные таблицы, которые содержат данные об объемах, координатах расположения в пространстве. Для каждого сортимента учитываются его длина и концевые диаметры.

Алгоритм моделирования работы харвестера представлен на рис. 1.

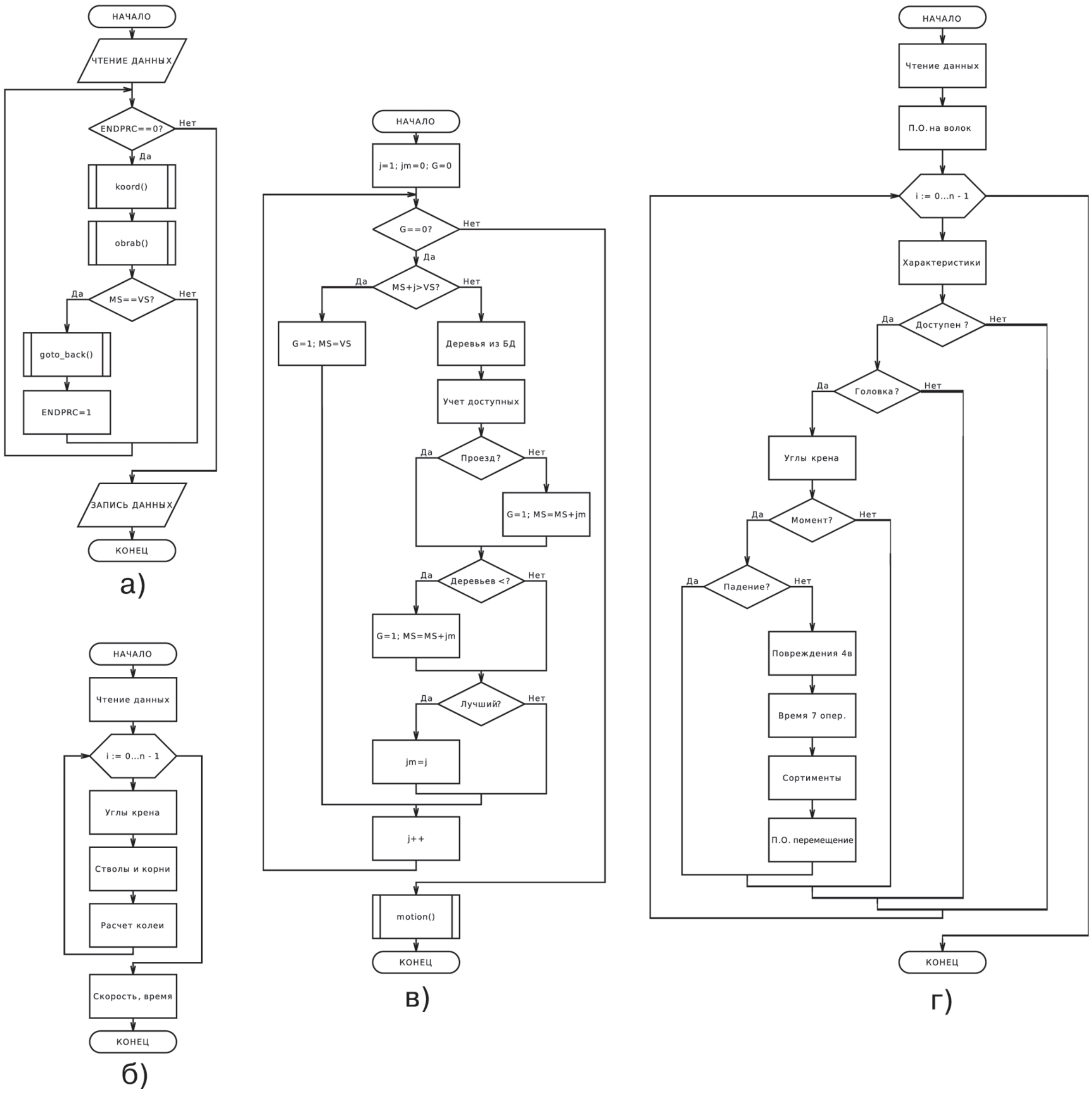


Рис. 1. Схема алгоритма моделирования работы харвестера:
а – основной цикл; б – подпрограмма движения; в – подпрограмма определения координат технологической стоянки; г – подпрограмма валки и обработки

Отличительными особенностями харвестера на базе экскаватора являются гусеничный движитель и поворотная платформа, на которой расположен как сам оператор, так и стрела с навешенной харвестерной головкой. Эти конструктивные особенности значительно влияют на моделирование операций наведения харвестерной головки на дерево, подтаскивания дерева и перемещения порубочных остатков. При моделировании учитываются время поворота платформы и время перемещения стрелы.

При наведении на дерево угол поворота платформы изменится и найдется как доля от полного оборота, а время на поворот платформы в секундах находится по формуле:

$$t_{pov} = \frac{fabs\left(\frac{(yg_1 - yg_2)}{2\cdot\pi}\right)\cdot 60}{n_{пл}},$$

где $n_{пл}$ – частота вращения платформы, мин. $^{-1}$; yg_1 – текущий угол поворота платформы, рад.; yg_2 – новый угол поворота платформы, рад.

Время, затраченное на движение стрелы в секундах,

$$t_{per} = \frac{fabs\left[\sqrt{(X_д - X_{маш})^2 + (Y_д - Y_{маш})^2} - \sqrt{(X_{old} - X_{маш})^2 + (Y_{old} - Y_{маш})^2}\right]}{V_{str}},$$

где V_{str} – скорость перемещения стрелы, м/с; $X_д$,$Y_д$ – координаты дерева, м; $X_{маш}$,$Y_{маш}$ – координаты машины, м; X_{old},Y_{old} – координаты харвестерной головки, м.

Общая скорость на операцию в секундах

$$t_{op} = (t_{pov} + t_{per}) \cdot k_{sov},$$

где k_{sov} – коэффициент совмещения операций поворота и перемещения (по хронометражным наблюдениям за машиной).

В подпрограмме передвижения необходимо учитывать грунтовые условия, которые влияют на возможность перемещения машины. Граничным условием, по которому определяем, что движение машины невозможно, является наличие колеи с глубиной, равной клиренсу машины. Кроме этого, глубина колеи и уплотнение грунта могут ограничиваться экологическими условиями.

Также в подпрограмме передвижения учитываются повреждения, наносимые оставляемым на доращивание деревьям, которые возникают при перемещении лесной машины по технологическому коридору в условиях сложного рельефа местности. Рассчитываются обдиры коры от корпуса машины, а также процент повреждения корневой системы (за исключением зимнего времени).

Моделирование рассмотренных выше операций работы харвестера реализовано на языке C++ (компилятор MinGW, инструментарий Qt 4.5). Полученная программа позволяет работать в двух режимах: без визуального представления процесса моделирования и в графическом режиме (рис. 2).

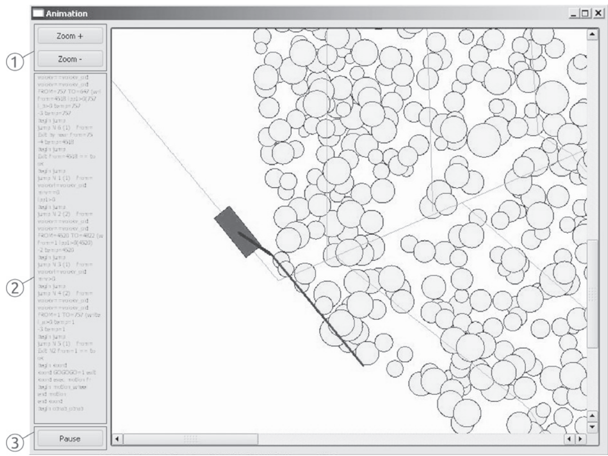


Рис. 2. Графический режим моделирования работы харвестера: 1 – управление масштабом; 2 – отладочная информация; 3 – кнопка «Пауза»

На программы, реализующие данные модели, получено свидетельство о регистрации в Реестре программ для ЭВМ № 2012615490 от 19 июня 2012 года.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов Ю. Ю. и др. Геоинформационные системы: теория и применение в лесном комплексе. Йоенсуу: Изд-во ун-та Йоенсуу, 2000. 201 с.
2. Герасимов Ю. Ю., Сюнёв В. С. Лесосечные машины для рубок ухода: компьютерная система принятия решений. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. 236 с.
3. Кильпеляйнен С. А., Перский С. Н. Выбор системы лесозаготовительных машин на базе ГИС-технологий // Структурная перестройка лесного комплекса Республики Карелия: Материалы республиканской науч.-практ. конф. Петрозаводск: КарНИИЛПК, 2003. С. 28–29.
4. Морозов Е. В., Шегельман И. Р., Будник П. В. Вероятностно-статистический анализ процесса заготовки сортиментов // Перспективы науки. 2011. № 7 (22). С. 183–186.
5. Чайка О. Р. Моделирование работы манипуляторной машины на несплошных рубках в естественных лесах // Лесосечные, лесоскладские работы и транспорт леса. Л.: Ленинградская лесотехническая академия им. С. М. Кирова, 1991. С. 56–60.
6. Ширнин Ю. А. Моделирование процессов заготовки сортированных деревьев и хлыстов. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1992. 204 с.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Технические науки** **2012**

УДК 519.853.62

АНТОН ИГОРЕВИЧ ШАБАЕВ
кандидат технических наук, директор Центра ПетрГУ-Метсо Систем Автоматизации, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ashabaev@petrsu.ru

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ КУЗНЕЦОВ
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kuznetcv@mail.ru

МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ СПИРИЧЕВ
программист Центра ПетрГУ-Метсо Систем Автоматизации, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
MaxSpirichev@gmail.com

ДМИТРИЙ ПЕТРОВИЧ КОСИЦЫН
кандидат технических наук, заместитель директора Центра ПетрГУ-Метсо Систем Автоматизации, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kositsyn@petrsu.ru

ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ КОМПЛЕКСА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ СКВОЗНЫМИ ПРОЦЕССАМИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ*

Представлен подход к созданию новой автоматизированной системы оптимального планирования «Лесопереработка» для повышения эффективности управления сквозными процессами использования древесины от леса до конечной продукции.

Ключевые слова: управление производством, лесопромышленный комплекс, методы оптимизации, исследование операций

Лесопромышленный комплекс (ЛПК) – один из важнейших секторов экономики России. Россия занимает 1-е место в мире по площади лесов и 2-е – по запасам древесины [2]. Лесные богатства России позволяют ей стать крупнейшим производителем продукции ЛПК в мире, однако на ее долю приходится всего 2 % мирового производства бумаги и картона (14-е место в мире на 2009 год [4]). При этом Финляндия, располагающая лишь 0,5 % мировых лесных ресурсов, является 5-м в мире крупнейшим производителем бумаги и картона и 7-м – лесопильной продукции.

В настоящее время одной из тенденций в добывающих и перерабатывающих отраслях промышленности (в том числе ЛПК, ЦБП и пр.) является создание территориально распределенных многоуровневых холдингов, включающих в себя от 3 до 30 (и даже более) предприятий (то есть общее количество предприятий составляет более 500) и осуществляющих полный цикл производства: заготовку сырья, его комплексную переработку с получением готовой продукции и транспортировку потребителям. Это позволяет (а иногда вынуждает) решать задачу выполнения одного крупного заказа несколькими (в том числе территориально удаленными друг от друга) предприятиями холдинга.

Примерами таких распределенных холдинговых структур в отраслях ЦБП и ЛПК России являются ЗАО «Инвестлеспром», ОАО «Группа Илим», ОАО «SFT Group» и др. Например, у ЗАО «Инвестлеспром» территориальные управления расположены в Москве, Вологде и Петрозаводске, а предприятия – в Республике Карелия, Кировской, Вологодской, Архангельской, Томской областях, Пермском крае, а также в 11 странах мира. У ОАО «Группа Илим» центральный офис расположен в Санкт-Петербурге, предприятия – в Архангельской и Иркутской областях, а также имеется централизованное сервисное предприятие («Финтранс»), оказывающее логистические и транспортные услуги в Ленинградской, Архангельской и Иркутской областях.

Среди зарубежных компаний ЛПК можно привести в качестве примера холдинг UPM Kymmene (Финляндия). Объем продаж холдинга в 2011 году превысил 10 млрд евро, более 45 его производственных предприятий расположены в 16 странах и сгруппированы в 9 бизнес-линий, включая централизованную службу лесоснабжения. Также среди компаний дальнего зарубежья можно упомянуть Abitibi-Bowater, West Fraser, Canfor (Канада), Weyerhaeuser (США) и многие другие.

ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Предприятия в составе вертикально-интегрированного операционного лесопромышленного холдинга, как правило, создают стоимость по цепочке «лес → древесина → целлюлоза → бумага → продукция», требуют высокого уровня интеграции и должны быть мотивированы на повышение прибыли по всей этой цепочке. Схема процессов использования древесины представлена на рис. 1 [6].

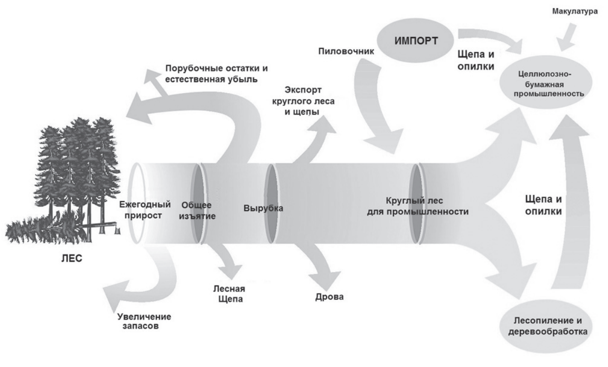


Рис. 1. Сквозная схема процессов использования древесины

Структура активов лесопромышленного холдинга:

- Лесозаготовительные (валка и первичная транспортировка). Основная продукция – «сырая» древесина. Интересны только в том случае, если связаны с поставками на предприятия холдинга.
- Лесопильные и деревообрабатывающие. Сырье – круглая древесина (пиловочник). Основная продукция – пиломатериалы и многое другое (фанера, плиты, мебель и т. д.). Сопутствующие виды продукции включают технологическую и энергетическую щепу и опилки. Активы интересны только в привязке к другим цепочкам создания стоимости, где за счет более высокого передела создается добавленная стоимость.
- Целлюлозно-бумажные. Сырье – круглая древесина, щепа. Основная продукция – целлюлоза, бумага, картон и многое другое.
- Производство упаковки, мешков и прочей продукции. Сырье – картон собственного или внешнего производства.

Примерная структура активов лесопромышленного холдинга изображена на рис. 2.

Рис. 2. Примерная структура активов лесопромышленного холдинга

Большое количество вовлеченных предприятий приводит к необходимости разработки процессов и процедур поиска решений «на стыках» во избежание внутренних конфликтов между продавцами и потребителями леса внутри холдинга, в том числе процессов:

- сквозного планирования цепочки поставок и интегрированного управления логистическими потоками внутри холдинга;
- закрепления решения задач взаимодействия между дивизионами в целях повышения EBITDA цепочки «лес → бумага → продукция» в регламентах и системе мотивации;
- рассмотрения заводов не как отдельных бизнесов, а как производственных элементов общей цепочки создания стоимости;
- оперативного учета данных о состоянии и параметрах производственного оборудования.

Необходимо выделить следующие задачи:

- Исследование лесосырьевой базы в целях определения номенклатуры и объемов заготовки и потребления лесосырья с учетом возможностей продажи части лесосырья определенного вида и качества непосредственно на лесосеке или его закупки у внешних поставщиков. Цель ее решения – расчеты оптимальных объемных показателей для каждой лесосеки и лесозаготовительного предприятия в целом (объемов заготовки, поставки, перевозки, внешних продаж) с целью минимизации суммарных затрат.
- Специализация предприятий холдинга и формирование номенклатуры продукции. Цель решения – определить для каждого предприятия номенклатуру наиболее подходящей продукции и используемые технологии, чтобы снизить себестоимость продукции, более эффективно использовать производственное оборудование, повысить качество продукции для максимизации общего экономического эффекта.
- Задача оптимального развития (реконструкции) предприятий и производственной инфраструктуры с учетом стратегии развития и специализации предприятий. Цель решения – оптимизация экономического эффекта холдинга от капиталовложений в развитие инфраструктуры, лесозаготовительной и иной производственной базы.
- Задача оптимального распределения операций по переработке и транспортировке лесосырья и продуктов его переработки (переделов) различного уровня в рамках цепочки «лес → древесина → целлюлоза → бумага → продукция». Цель решения – минимизация транспортно-производственных затрат предприятий холдинга для выработки всей требуемой продукции.
- Совместное решение задач производства и транспортировки продукции. Цель – составление плана производства продукции группой

предприятий и транспортировки сырья, полуфабрикатов и готовой продукции.

- Задача управления запасами лесосырья и продуктов, а также транспортными потоками с учетом сезонности и спроса на продукцию. Цель решения – оптимальное управление логистикой в рамках холдинга. Себестоимость лесозаготовок в течение года может различаться до 25 %.

В целом теоретической и методологической основой решения задач планирования и управления производственными процессами являются достаточно хорошо известные методы исследования операций и математического программирования [5], [7], [8], однако «классические» задачи редко встречаются в чистом виде. Прикладные задачи существенно усложняются необходимостью учета дополнительных требований и факторов, в том числе:

- Учет стохастических факторов и элементов неопределенности, обусловленных неполнотой или возможными искажениями нормативной и оперативной информации. К примеру, лесозаготовка и транспортировка лесосырья существенно зависят от сезона и погодных условий.
- Многоцелевой характер задач планирования и управления.
- Учет большого количества альтернативных технологий переработки древесины в целях выбора согласованных режимов переработки лесосырья, обеспечивающих минимальные потери материала.
- Требование комплектности производства некоторых видов продукции, то есть пропорциональности объемов их производства, с поправкой на имеющиеся запасы по каждому виду.
- Неделимость и целочисленность производства некоторых видов лесопродукции и расходования лесосырья.
- Дискретность в выборе номенклатуры и текущих объемов выработки продукции, суть которой заключается в принятии решения либо не производить лесопродукцию определенного вида, либо производить ее в объеме, не меньшем установленной нижней границы.
- Учет большого количества самых разных технологических особенностей лесопереработки. Например, чтобы заказ не находился на границе раскроя, он выпускался на определенном агрегате, чтобы шел парной доской, исключал сердцевину бревна и т. д.
- Возможность частичной взаимозамены лесосырья и лесопродукции различного вида, к примеру, замены части шпонов или переработки фанеры с неудачными внешними слоями в ламинат.
- Степень загрузки и состояние оборудования.

Для решения задач с указанными дополнительными требованиями необходимы специальные средства преобразования решений, полученных методами линейного программирования. Нередко объем вычислений, связанных с подобными преобразованиями, существенно выше, чем при решении основной задачи. Расширение объекта планирования при переходе от одного предприятия к группе (холдингу и т. д.) приводит к необходимости решения дискретных линейных и нелинейных задач сложной структуры и большой размерности, что требует исследования и разработки схем декомпозиции возникающих оптимизационных задач.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ

Сформулируем основную математическую задачу. Пусть $p \in P$ – множество территориально распределенных производственных звеньев (предприятий). Каждое производственное звено $p \in P$ может организовывать собственную работу в соответствии с производственным заданием холдинга в целом.

Обозначим $N_p \subset N$ – подмножество технологических операций (технологий), выполняемых производственным звеном с индексом $p \in P$; их объединение обозначим $N = \bigcup_{p \in P} N_p$, множества N_p будем считать непересекающимися для различных $p \in P$. Поскольку решение производственной задачи может быть связано с использованием различных технологий, основные управляющие факторы – интенсивности использования соответствующих технологий, которым сопоставим переменные x_j $(j \in N)$. Эти переменные ограничены сверху неотрицательными величинами d_j, а их совокупность в силу ряда производственных условий содержится в некотором множестве Ω_p. Затраты, связанные с использованием технологий, отражает функционал $F_p(x[N_p])\colon \Omega_p \to \mathrm{R}^1$.

Кроме собственных ресурсов производственная программа различных звеньев $p \in P$ может включать обработку множества S внешних ингредиентов (переделов) технологической системы. Типичные примеры ресурса $s \in S$ – баланс, щепа, целлюлоза, картон. Предполагается, что каждый ингредиент $s \in S$ связан по меньшей мере с двумя производственными звеньями.

Интенсивности технологий производства $p \in P$ определяют объемы выработки и потребления ресурсов $\omega_p[S] = (\omega_p^1, \omega_p^2, \dots, \omega_p^{|S|})$, что отражает оператор: $G_p(x[N_p])\colon \Omega_p \to \mathrm{R}^{|S|}$, то есть $\omega_p[S] = G_p(x[N_p])$. Отметим, что $\omega_p[S] \geq 0$ – для пункта производства p продукта s, $\omega_p[S] \leq 0$ – для пункта потребления p продукта s, $\omega_p[S] = 0$ – если производство p не связано с потреблением или выработкой продукта s.

Для пункта $p \in P$ будем считать объемы внешней выработки и потребления ресурса s равными z_p^s и ограниченными сверху и снизу значениями $H_p^s \geq h_p^s$ $(p \in P, s \in S)$. Значения H_p^s и h_p^s могут быть близки или даже равны нулю для производственного передела $s \in S$; положительны, если s – индекс вырабатываемой продукции для пункта p, и отрицательны, если s – некоторый внешний (ввозимый) ресурс для пункта p. Стоимость ресурса s в пункте p обозначим c_p^s ($p \in P, s \in S$).

В силу пространственной распределенности потоки материальных ресурсов являются транспортными потоками y^s_{pq} ($p, q \in P, s \in S$). Эти потоки неотрицательны, затраты, связанные с транспортировкой ресурсов, будем считать линейными и пропорциональными значениям σ^s_{pq} при $p, q \in P, s \in S$.

Построим целевую функцию:

- $\sum\limits_{s\in S}\sum\limits_{p\in P} c_p^s z_p^s$ – суммарная прибыль и затраты, связанные с внешней выработкой и потреблением ресурсов,
- $\sum\limits_{p\in P} F_p(x[N_p])$ – суммарные затраты, связанные с производством,
- $\sum\limits_{s\in S}\sum\limits_{p,q\in P} y^s_{pq}\sigma^s_{pq}$ – суммарные затраты, связанные с транспортировкой ресурсов,

получим суммарную прибыль

$$\sum_{s\in S}\sum_{p\in P} c_p^s z_p^s - \sum_{p\in P} F_p(x[N_p]) - \sum_{s\in S}\sum_{p,q\in P} y^s_{pq}\sigma^s_{pq}.$$

Построим ограничение на баланс ресурса s в пункте p:

- $\omega_p[s_j]$ – объемы выработки и потребления ресурса,
- z^s_p – объемы внешней выработки и потребления ресурса,
- $\sum\limits_{q\in P} y^s_{qp}$ – суммарный объем привезенного ресурса из других пунктов,
- $\sum\limits_{q\in P} y^s_{pq}$ – суммарный объем вывезенного ресурса в другие пункты,

получим $\omega_p[s_j] - z_p^s + \sum\limits_{q\in P} y^s_{qp} - \sum\limits_{q\in P} y^s_{pq} = 0$.

Добавим ограничения на интенсивность производства $x[N_p] \in \Omega_p$, ограничения на объемы внешней выработки и потребления ресурса $h^s_p \le z^s_p \le H^s_p$, неотрицательность транспортных потоков $y^s_{pq} \ge 0$.

Таким образом получим задачу следующего вида:

$$\sum_{s\in S}\sum_{p\in P} c_p^s z_p^s - \sum_{p\in P} F_p(x[N_p]) - \sum_{s\in S}\sum_{p,q\in P} y^s_{pq}\sigma^s_{pq} \to \max$$

$$\omega_p[s_j] - z_p^s + \sum_{q\in P} y^s_{qp} - \sum_{q\in P} y^s_{pq} = 0, \forall p \in P, s \in S,$$

$$x[N_p] \in \Omega_p,\ \forall\ p\in P$$

$$h^s_p \le z^s_p \le H^s_p,$$

$$y^s_{pq} \ge 0,\ \forall\ p,q\in P,\ s\in S.$$

ИМЕЮЩИЙСЯ ЗАДЕЛ

Следует отметить, что в Петрозаводском госуниверситете под нашим руководством и при нашем непосредственном участии уже проводились исследования, нацеленные на решение частных задач, и осуществлялись разработки, ориентированные на внедрение программных систем на предприятиях ЦБП и ЛПК [1], [3]. Имеются отраслевые свидетельства о регистрации программных систем для решения отдельных задач оптимального планирования и управления производственными процессами предприятий.

В частности, был разработан модуль UPS. Solver («универсальный решатель»). В его составе реализован так называемый «матричный конструктор», главная цель которого – построение структуры данных для хранения матрицы ограничений в прикладных задачах оптимизации. Матричный конструктор позволяет удобно и корректно формировать матрицу ограничений с учетом ее блочной структуры, а также эффективно организовать работу с матрицей для получения данных, операций с ней, модификации в случае изменения условий задачи или необходимости ее адаптации для другого предприятия и т. д. С использованием матричного конструктора реализованы алгоритмы эффективного решения задач линейного, динамического и дискретного программирования, ряда задач выпуклого программирования; задач высокой размерности; многоцелевых задач с комбинированными критериями и др. Это позволяет с минимальными затратами находить решение широкого круга оптимизационных задач планирования и управления предприятием [3].

Для реализации пользовательского интерфейса программных систем разработана библиотека UPS Framework, которая включает большое количество тесно интегрированных друг с другом программных компонент, позволяющих унифицировать процессы и ускорить разработку модулей системы, упростить программное описание моделей данных, уменьшить количество ошибок. Все компоненты UPS Framework интегрированы в среду программирования MS Visual Studio .NET [1].

Поскольку ранее разработанные программные системы ориентированы на отдельные предприятия, то требуются дополнительные исследования и разработки для их адаптации к использованию в условиях холдинга, состоящего из нескольких (или нескольких десятков) территориально распределенных предприятий. Тем не менее имеющийся опыт позволяет осуществить постановку многопродуктовой производственно-транспортной задачи, провести ее исследование и предложить методы решения возникающих задач и подзадач с целью широкого тиражирования, внедрения и сопровождения новой автоматизированной системы оптимального планирования (АСОП) «Лесопереработка» для оптимального планирования и управления сквозными процессами использования древесины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный поиск не выявил прямых аналогов разрабатываемой АСОП «Лесопереработка». Имеются только условные аналоги, общим существенным недостатком которых является отсутствие использования сложных математических алгоритмов для решения задач планирования производства с учетом большого количества дополнительных ограничений, обусловленных особенностями производств и технологий предприятий ЛПК.

АСОП «Лесопереработка» ориентирована как на внутренний, так и на внешние рынки сбыта. Математические модели и методы решения задач обладают достаточной общностью и могут использоваться для планирования и управления производствами на не менее 500 предприятий отраслей ЦБП и ЛПК России и других стран.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг., а также при поддержке госконтракта № 14.514.11.4004 Министерства образования и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин А. В., Шабаев А. И., Печников А. А. Конвейерная технология разработки программного обеспечения для управления производственными ресурсами и процессами // Перспективы науки. 2010. Т. 4. С. 95–99.
2. Выступление руководителя Федерального агентства лесного хозяйства В. Н. Маслякова [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.rosleshoz.gov.ru/media/appearance/68
3. Кузнецов В. А., Печников А. А., Шабаев А. И. Многофункциональная программная система разработки приложений для задач раскроя материалов и комплектования изделий // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 11. С. 10–14.
4. Список стран, производящих бумагу и картон [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран,_производящих_бумагу_и_картон
5. Таха Х. А. Введение в исследование операций. М.: Вильямс, 2005. 912 с.
6. Forest.fi [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.forest.fi
7. Stevenson W. J. Operations Management. Boston: McGraw-Hill Companies, Incorporated, 2011. 908 p.
8. Wang L., Shen W. Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing. London: Springer, 2007. 430 p.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Технические науки** **2012**

УДК 536.244

ВЛАДИМИР АНДРЕЕВИЧ БАБКИН
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
babkin@karelia.ru

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ МОДЕЛИ АНИЗОТРОПНОЙ ПРИСТЕНОЧНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ ВОДЫ И ВОЗДУХА*

В результате сравнения решений задач о сопротивлении и теплообмене при турбулентных течениях воды и воздуха в трубах и плоских каналах, полученных в рамках модели пристеночной анизотропной турбулентности, с известными эмпирическими формулами найдены зависимости от температуры коэффициентов, определяющих турбулентную вязкость и турбулентную теплопроводность воды и воздуха в этой модели.

Ключевые слова: модель пристеночной турбулентности, турбулентная вязкость, турбулентная теплопроводность, температурная зависимость для воды и воздуха

ВВЕДЕНИЕ

В модели анизотропной пристеночной турбулентности турбулентное течение жидкости рассматривается как течение анизотропной жидкости, анизотропия которой определяется когерентной системой вихрей, вытянутых по потоку [1], [2]. Кинематическими параметрами, которыми задается движение в точке потока в декартовых координатах x_1, x_2, x_3, являются скорость u_i и единичный вектор, задающий локальную анизотропию, – директор n_i.

Все локальные величины, характеризующие состояние и движение системы, по определению считаются объемно осредненными. Для несжимаемой жидкости уравнения движения имеют вид [1], [2]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \tag{1}$$

$$\rho\frac{du_i}{dt} = \frac{\partial p_{i\alpha}}{\partial x_\alpha} + \rho f_i, \tag{2}$$

$$\rho\frac{d}{dt}\left(I\frac{dn_i}{dt}\right) = \frac{\partial \beta_{ij}}{\partial x_j} + g_i + \rho F_i, \tag{3}$$

$$\rho\frac{dU}{dt} = p_{ij}e_{ij} + \beta_{ij}N_{ij} - g_iN_i + Q - \frac{\partial q_i}{\partial x_i}, \tag{4}$$

где t – время, ρ – плотность жидкости, u_i – скорость, p_{ij} – напряжения, f_i – плотность массовой силы, U – внутренняя энергия единицы массы, Q – интенсивность источника тепла, q_i – поток тепла. Величины β_{ij}, g_i, F_i называются соответственно обобщенным напряжением, обобщенной внутренней и обобщенной внешней массовой силой. Величина I характеризует осредненную инерционность структуры при повороте элементов вихревой структуры. По повторяющимся индексам предполагается суммирование от 1 до 3.

Определяющие уравнения учитывают специфику среды. В рассматриваемой модели они имеют вид

$$p_{ij} = -p\delta_{ij} + \sigma_{ij} + \tau_{ij}, \tag{5}$$

$$\sigma_{ij} = Kn_{\alpha,i}(n_{j,\alpha} - n_{\alpha,j} + n_jn_\beta n_{\alpha,\beta}), \tag{6}$$

$$\tau_{ij} = \mu_1 n_\alpha n_\beta e_{\alpha\beta}n_in_j + \mu_0 e_{ij}, \tag{7}$$

$$\beta_{ij} = \kappa_j n_i + K(n_{i,j} - n_{j,i} - n_jn_\alpha n_{i,\alpha}), \tag{8}$$

$$g_i = \chi n_i - (\kappa_\beta n_i)_{,\beta} + Kn_\alpha n_{\beta,\alpha}n_{\beta,i}, \tag{9}$$

$$q_i = -(\lambda_0 T_{,i} + \lambda_1 n_in_jT_{,j}), \tag{10}$$

$$n_{i,j} = \frac{\partial n_i}{\partial x_j}, \quad e_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \; \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_j\frac{\partial}{x_j}, \; \dot{n}_i = \frac{dn_i}{dt},$$

$$N_i = \dot{n}_i - \omega_{i\alpha}n_\alpha, \qquad N_{ij} = \dot{n}_{i,j} - \omega_{i\alpha}n_{\alpha,j}, \; 2\omega_{ij} = u_{ij} - u_{ji}.$$

Здесь p – давление, T – температура, σ_{ij} – напряжения, обусловленные наличием в среде вихревой структуры, τ_{ij} – вязкие напряжения, λ_0, λ_1, μ_0, μ_1, K – коэффициенты модели, δ_{ij} – символ Кронекера, χ и κ_i – произвольные скалярная и векторная функции соответственно. Поскольку свойства жидкости вблизи твердой стенки определяются пристеночной вихревой структурой потока, то коэффициенты λ_0, λ_1, μ_0, μ_1, K могут зависеть от параметров, глобально характеризующих течение, например от числа Рейнольдса.

Характерными величинами, определяющими турбулентную вязкость и турбулентную теплопроводность жидкости, являются коэффициенты λ_0, λ_1, μ_0, μ_1. При течениях в трубе радиусом R и в плоском канале шириной $2H$ их величины для воздуха при температуре T = 20 °С и при нормальном давлении найдены [1], [2] сравнением решений ряда задач с опытными данными: $\mu_0 = 1{,}85\cdot10^{-6}$ Па·с, $\mu_1 = 0{,}047u_*$ Па·с, $\lambda_0 = 0{,}28Ru_*$ Вт/(м·К) ($0{,}28Hu_*$ для плоского канала), $\lambda_1 = 46{,}5u_*$ Вт/(м·К), где $u_* = \sqrt{\tau_w/\rho}$ – динамическая скорость. Определению зависимости коэффициентов μ_0,

$\mu_1, \lambda_0, \lambda_1$ для воды и воздуха от температуры посвящена настоящая работа.

КОЭФФИЦИЕНТЫ μ_0 И μ_1

Решение задачи об установившемся турбулентном течении несжимаемой жидкости (воды или воздуха) в круглой трубе при постоянной температуре в рамках рассматриваемой модели в цилиндрической системе координат r, φ, x (ось x – по оси трубы в направлении течения) имеет вид [1], [2]

$$u = Au_*[\Phi(\xi) - \Phi(1)], \quad \Phi(\xi) = F(t(\xi)), \quad t(\xi) = [1 - 3bR(1-\xi)]^{1/3}, \quad (11)$$

$$F(t) = \frac{3bR-1}{2\gamma^2-1}\left(\sqrt{\gamma^2-1}\,\mathrm{arctg}\frac{t}{\sqrt{\gamma^2-1}} + \frac{\gamma}{2}\ln\frac{\gamma-t}{\gamma+t}\right) +$$
$$\frac{1+2\varepsilon}{4(2\gamma^2-1)}\ln\frac{\gamma^2-t^2}{t^2+\gamma^2-1} + \frac{1}{4}\ln\left|t^4 - t^2 - \varepsilon\right| + \frac{t^2}{2},$$

$$A = \frac{\rho u_*}{3\mu_1 b^2 R}, \quad u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad \varepsilon = \frac{\mu_0}{2\mu_1}, \quad 2\gamma^2 = 1 + \sqrt{1+4\varepsilon}, \ \xi = \frac{r}{R},$$

где b – постоянная интегрирования уравнения, задающего изменение директора по сечению потока, определяется экспериментально.

Определяя профили скоростей (11) при разных температурах с учетом теплофизических свойств обеих сред [7], [8] и сравнивая эти профили с универсальным профилем трубы [4]

$$\frac{u}{u_*} = 5{,}75\lg\frac{(R-r)u_*}{\nu} + 5{,}5, \quad (12)$$

где ν – кинематическая вязкость воды или воздуха, для каждого значения температуры получаем величины μ_0, μ_1 и b.

Ограничимся диапазоном температур от 0 до 100 °С. Как оказалось, коэффициенты μ_0, μ_1 для воды и воздуха при изменении температуры ведут себя различно. Для воды при 5 °С ≤ Т ≤ 100 °С имеем

$$b = 4{,}80\,\text{м}^{-1}, \qquad \mu_0 = (2{,}63 - 1{,}20\lg T)^{-4}, \qquad \mu_1 = 40u_*, \quad (13)$$

тогда как для сухого воздуха при 0 °С ≤ Т ≤ 100 °С

$$b = 4{,}80\,\text{м}^{-1}, \qquad \mu_0 = 2{,}0\cdot 10^{-6}, \ \mu_1 = u_*(0{,}051 - 0{,}00012T), \quad (14)$$

где T – температура в градусах Цельсия, μ_0 и μ_1 – в Па · с, u_* – в м/с.

Совершенно аналогично, сравнивая профили скоростей при течении несжимаемой жидкости в плоском канале шириной $2H$, полученные на базе рассматриваемой модели [1], [3], с универсальным профилем для канала

$$\frac{u}{u_*} = 5{,}75\lg\frac{(H-|y|)u_*}{\nu} + 5{,}5, \quad (15)$$

получаем те же формулы (13) и (14). В формуле (15) $(H - |y|)$ – расстояние от стенки канала до точки потока с координатой у, отсчитываемой от срединной плоскости канала перпендикулярно течению.

На рис. 1 и 2 профили скоростей (точки) для течений воды и воздуха в гладкой трубе диаметром d = 80 мм и гладком канале шириной 2H = 80 мм при 0 °С или 10 °С и 100 °С, вычисленные с учетом формул (13) и (14), при разных числах Рейнольдса (Re = 2wR/ν для круга и Re = 4wH/ν для канала, w – средняя скорость) сравниваются с универсальным профилем скоростей [4]

$$\frac{u}{u_*} = 5{,}75\lg\eta + 5{,}5, \ \eta = \frac{su_*}{\nu}, \quad (16)$$

где s − расстояние от твердой стенки до точки в потоке.

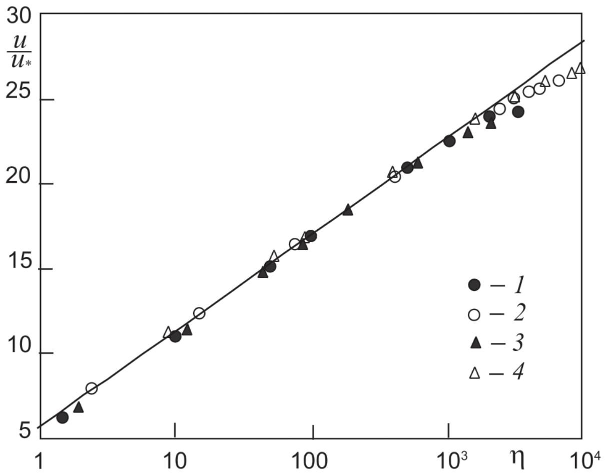


Рис. 1. Профили скоростей при течении воды в трубе и плоском канале при T = 10 °С, 100 °С. Кривая − универсальный профиль (16). Точки − результат расчета: *1* − труба, 10°, Re = 285000; *2* − труба, 100°, Re = 420000; *3* − канал, 10°, Re = 404000; *4* − канал, 100°, Re = 970000

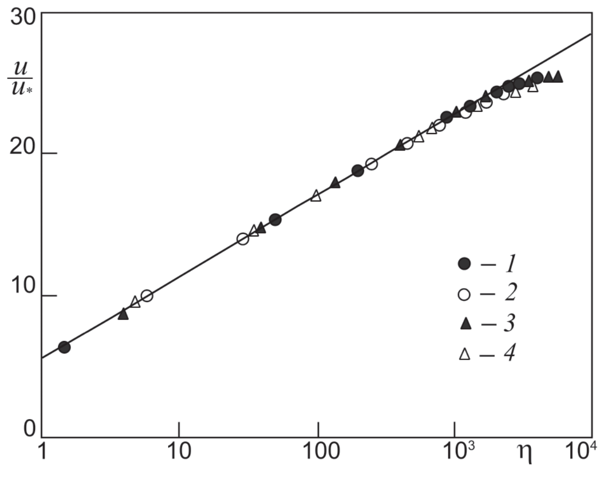


Рис. 2. Профили скоростей при течении воздуха в трубе и плоском канале при T = 0 °С, 100 °С. Кривая − универсальный профиль (16). Точки − результат расчета: *1* − труба, 0°, Re =243000; *2* − труба, 100°, Re = 227000; 3 − канал, 0°, Re = 510000; *4* − канал, 100°, Re =474000

Стоит отметить, что значения μ_0, μ_1 для воздуха при 20 °С, которые следуют из формул (14), близки указанным во введении значениям, которые ранее были получены на основе конкретных опытных данных.

КОЭФФИЦИЕНТЫ λ_0 И λ_1

Процессы теплообмена в трубах и каналах описываются уравнением распространения тепла, которое в рамках данной модели следует из уравнений (4) и (10). Пусть в гладкой круглой полубесконечной трубе $x \geq 0$ радиуса R требуется найти установившееся распределение температуры $T(r, x)$ при установившемся турбулентном течении несжимаемой жидкости, при постоянной температуре стенки T_w и постоянной температуре T_0 на входном сечении $x = 0$. В безразмерных переменных

$$\Theta = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w}, \quad \xi = \frac{r}{R}, \quad X = \frac{x}{R}, \tag{17}$$

в цилиндрических координатах r, φ, x при Q = 0 уравнение распространения тепла имеет вид [1]

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \Psi_1(\xi)\frac{\partial \Theta}{\partial \xi} = \Psi_2(\xi)\frac{\partial \Theta}{\partial X} \tag{18}$$

$$\Psi_1(\xi) = \frac{1}{\xi} - \frac{2\lambda_1 bR}{t(\xi)\left[\lambda_0 + \lambda_1(1 - t^2(\xi))\right]},$$

$$\Psi_2(\xi) = \frac{\rho c_p u_* AR\,(\Phi(\xi) - \Phi(1))}{\lambda_0 + \lambda_1(1 - t^2(\xi))},$$

где c_p – теплоемкость при постоянном давлении, λ_0, и λ_1 – коэффициенты, через которые определяется поток тепла q_i по формуле (10), $t(\xi)$ и $\Phi(\xi)$ – функции, определенные в (11).

Решение уравнения (18) с граничными условиями

$$\Theta(\xi, 0) = 1, \qquad \Theta(1, X) = 0 \tag{19}$$

позволяет найти коэффициент теплоотдачи на стенке трубы в виде локального числа Нуссельта Nu по формулам [1], [2]

$$\mathrm{Nu} = -\frac{2\lambda_0}{\lambda\overline{\Theta}}\left(\frac{\partial \Theta}{\partial \xi}\right)\Bigg|_{\xi=1}, \quad \overline{\Theta}(X) = \frac{2}{w}\int_0^1 \Theta(\xi, X)u(\xi)\xi d\xi, \tag{20}$$

где $\overline{\Theta}$ – средняя массовая температура по сечению трубы, λ – коэффициент молекулярной теплопроводности, w – средняя скорость.

Значения числа Нуссельта Nu, вычисленные при температурах воды и воздуха в диапазоне от нуля до 100 °C и при разных числах Рейнольдса Re, сравнивались со значениями Nu, которые при тех же условиях течения для предельного числа Нуссельта Nu_∞ даются соответственно работам [5], [9], [6] эмпирическими формулами:

$$\mathrm{Nu}_\infty = \frac{f\,\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}/8}{1 + \dfrac{900}{\mathrm{Re}} + 12{,}7\sqrt{\dfrac{f}{8}}\left(\mathrm{Pr}^{2/3} - 1\right)}, \tag{21}$$

$$\mathrm{Nu}_\infty = \frac{\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}\sqrt{f/2}}{4{,}24\ln(\mathrm{Re}\sqrt{f/16}) + 25{,}0\,\mathrm{Pr}^{2/3} + 4{,}24\ln\mathrm{Pr} - 20{,}2}, \tag{22}$$

$$\mathrm{Nu}_\infty = 7{,}6 - \frac{3{,}6}{\lg\mathrm{Re}} + 0{,}0096\mathrm{Re}^{0{,}87}\mathrm{Pr}^{0{,}605}, \tag{23}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\rho \nu c_p}{\lambda}, \quad f = \frac{1}{(1{,}82\lg\mathrm{Re} - 1{,}64)^2}. \tag{24}$$

Как и для коэффициентов μ_0, μ_1, зависимость коэффициентов λ_0, λ_1 от температуры для воды и воздуха различна. Для воды при течении в трубе при 5 °C ≤ T ≤ 100 °C она имеет вид

$$\lambda_0 = G(T)\sqrt{f/8}, \ \lambda_1 = 12000u_*, \ G(T) = 0{,}0360 - 0{,}000211T. \tag{25}$$

Для воздуха

$$\lambda_0 = u_* R(0{,}30 - 0{,}001T), \ \lambda_1 = 46{,}5u_*. \tag{26}$$

В формулах (25) и (26) T – температура в градусах Цельсия, λ_0, λ_1 – в Вт/(м · К), R – в метрах, u_* – в м/с.

Следуя работе [3], при условии, что пристеночная турбулентность заполняет всю область течения, сравнением с эмпирическими формулами (21)–(23) можно получить аналоги формул (25) и (26) при теплообмене в плоском канале шириной $2H$. Для воды

$$\lambda_0 = 0{,}5G(T)\sqrt{f/8}, \ \lambda_1 = 12000u_*, \ G(T) = 0{,}0360 - 0{,}000211T. \tag{27}$$

Для воздуха

$$\lambda_0 = u_* H(0{,}30 - 0{,}001T), \ \lambda_1 = 46{,}5u_*. \tag{28}$$

При течении в канале числа Рейнольдса Re и Нуссельта Nu определяются формулами [5]:

$$\mathrm{Re} = \frac{4wH}{\nu}, \tag{29}$$

$$\mathrm{Nu} = -\frac{4\lambda_0}{\lambda\overline{\Theta}}\left(\frac{\partial \Theta}{\partial \xi}\right)\Bigg|_{\xi=1}, \quad \overline{\Theta} = \frac{1}{w}\int_0^1 \Theta(\xi, X)u(\xi)d\xi, \tag{30}$$

где Θ – безразмерная температура, определяемая формулой (17), $\overline{\Theta}$ – средняя массовая температура, $\xi = y/H$ – безразмерная поперечная координата в канале, отсчитываемая от срединной плоскости канала.

На рис. 3 представлены графики зависимостей предельного числа Нуссельта Nu_∞ от числа Рейнольдса Re при течении воды в трубе и плоском канале при постоянной температуре стенок, вычисленные на основе решений [1], [2], [3] при температуре воды 10 °C и при 100 °C с использованием формул (13), (25) и (27) (точки), а также соответствующие графики формул (21)–(23) (кривые *1–3* для 10 °C; кривые *1′–3′* для 100 °C). Поскольку для воздуха аналогичные зависимости вплоть до 100 °C различаются несильно, на рис. 4 приведены графики расчетных величин (точки) и формул (21)–(23) только при температуре 100 °C. Все расчеты проведены для трубы диаметром d = 80 мм и канала шириной $2H$ = 80 мм. Как видим, результаты расчетов вполне удовлетворительно согласуются с эмпирическими формулами. Отметим, что при 20 °C для воздуха из формул (28) следуют значения λ_0, λ_1, указанные во введении.

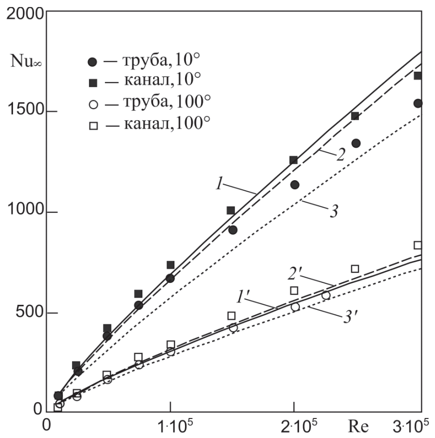


Рис. 3. Зависимость предельного числа Нуссельта Nu_∞ от числа Рейнольдса Re для воды в трубе и канале при $T = 10$ °C, 100 °C. Точки − результат расчета; кривые − графики эмпирических формул: *1*, *1′* − (21) [5]; *2*, *2′* − (22) [9]; *3*, *3′* − (23) [6]

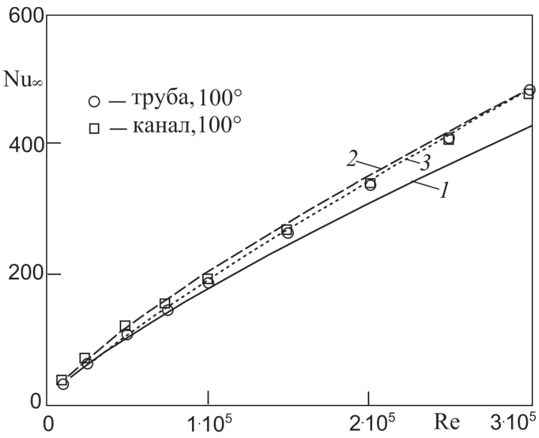


Рис. 4. Зависимость предельного числа Нуссельта Nu_∞ от числа Рейнольдса Re для воздуха в трубе и канале при $T = 100$ °C. Точки − результат расчета; кривые − графики эмпирических формул: *1* − (21) [5]; *2* − (22) [9]; *3* − (23) [6]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в данной работе зависимости коэффициентов μ_0, μ_1, λ_0, λ_1 от температуры, с одной стороны, увеличивают круг задач, которые можно численно решать в рамках модели пристеночной анизотропной турбулентности, а с другой стороны, расширяют наши представления о турбулентности в таких широко используемых средах, как вода и воздух. В частности, очевидно наблюдаемое различие в поведении коэффициентов, определяющих турбулентную вязкость и турбулентную теплопроводность воды и воздуха при увеличении температуры сред.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арсеньев С. А., Бабкин В. А., Губарь А. Ю., Николаевский В. Н. Теория мезомасштабной турбулентности. Вихри атмосферы и океана. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. 308 с.
2. Бабкин В. А. Профили скоростей и теплообмен при турбулентных течениях в гладкой и шероховатой трубах // Докл. РАН. 2006. Т. 411. № 1. С. 51−54.
3. Бабкин В. А. Теплообмен при турбулентном течении несжимаемой жидкости в плоском канале с постоянной температурой стенок // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 6 (119). С. 72−77.
4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 848 с.
5. Петухов Б. С., Поляков А. Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. М.: Наука, 1986. 192 с.
6. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. М.: Атомиздат, 1978. 296 с.
7. Хомутский Ю. Физические и теплофизические свойства воздуха [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://alldc.ru/article147
8. Хомутский Ю. Физические и теплофизические свойства воды [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://alldc.ru/article151
9. Kader B. A., Yaglom A. M. Heat and mass transfer laws for fully turbulent wall flows // Int. J. Heat Mass Transfer. 1972. Vol. 15. № 12. P. 2329–2351.

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Декабрь, № 8. Т. 2 **Технические науки** **2012**

УДК 62-6

СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ БЕЛЯЕВ
кандидат технических наук, доцент кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
sergbel@psu.karelia.ru

ГЕННАДИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ ДАВЫДКОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
davydkov@psu.karelia.ru

СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ПЕРСКИЙ
кандидат технических наук, доцент кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
persky@psu.karelia.ru

БИОТОПЛИВА ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ: ЕВРОПЕЙСКИЙ ОПЫТ*

Рассмотрены основные источники получения биотоплив, анализируются их характеристики, уделяется внимание экологическим свойствам. Делается вывод, что биотоплива второго поколения имеют потенциал для замещения существенного количества нефти при использовании относительно дешевых ресурсов биомассы и способствуют уменьшению выбросов парниковых газов.

Ключевые слова: биотоплива, второе поколение биотоплив, технологии Фишера – Тропша

Проблема экологии сегодня имеет международное значение, став практически общей для всех стран мира. Антропогенное воздействие на окружающую среду от применения нефтяных (минеральных) топлив на автомобильном транспорте проявляется в основном усилением парникового эффекта и негативным влиянием на здоровье человека.

Нежелательное влияние токсичных выбросов оксида углерода, других продуктов неполного сгорания топлива и оксидов азота в основном была решена с внедрением экологических стандартов, подобных Евро 2–4 [6]. В настоящее время основной упор делается на дальнейшее сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу автомобильным транспортом. Тем более что и в ближайшей, и в долгосрочной перспективе сохраняются тенденции существенного увеличения парка автомобилей [2].

В этой связи все большее внимание уделяется поиску новых, эффективных, экологически чистых, возобновляемых источников энергии. Среди широко известных альтернативных источников энергии, имеющих потенциал для замещения существенного количества нефтяных топлив, биотоплива занимают исключительно важное положение [3], [5], [7], [9], [12].

Основными значимыми преимуществами биотоплив являются: повышение энергетической безопасности, уменьшение выбросов парниковых газов, развитие экономики, в некоторых случаях – защита экосистем и т. д. [17].

Среди основных проблем, препятствующих широкому применению биотоплив, можно выделить следующие: более высокая стоимость и большие затраты энергии при их получении по сравнению с нефтяным (минеральным) топливом; требуется изменение конструкции систем питания автомобилей; отсутствует развитая инфраструктура производства, доставки и сбыта [17]; для некоторых регионов возможна конкуренция с производством продуктов питания и влияние природных условий на урожайность многих сельскохозяйственных культур.

Альтернативные топлива для транспорта применяются в разных регионах мира не одно десятилетие, в виде биоэтанола для бензиновых двигателей [1], [5], получаемого при ферментации сахара или крахмала, и биодизеля – топлива для дизельных двигателей, получаемого при трансэстерификации (образовании сложных эфиров растительных масел или животных жиров – FAME) [19]. Часто эти топлива называют первым поколением биотоплива. В основном их получают из возобновляемого сырья растительного происхождения. Сокращение выбросов CO_2 при их применении, по сравнению с минеральным топливом, относительно скромное, поскольку конечный выход топлива с гектара земли относительно небольшой. Например, в Англии годовое потребление топлива автомобильным транспортом составляет около 40 млн тонн. Для полного замещения минерального топлива биотопливом потребуется порядка 20 млн га при наличии 6,5 млн га, пригодных для производства биотоплив [16]. Аналогичная ситуация наблюдается для многих стран Европы и мира (табл. 1) [9], [10], [11]. Следует также отметить, что существующие технологии производства биотоплива первого поколения не в полной степени удовлетворяют экономическим критериям.

Таблица 1

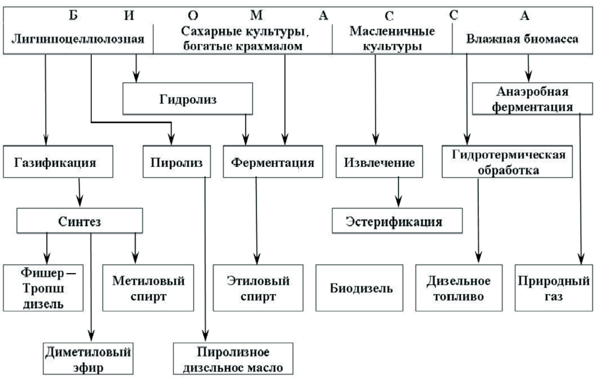
Урожайность масленичных культур и выход биодизеля

Культура	Урожай, т/га	Содержание масел, %	Выход биодизеля, л/га
Соя	2,67	18	524
Хлопок	1,05	19	216
Канола	1,54	40	665
Подсолнечник	1,52	40	657
Арахис	3,40	25	920
Рапс	1,47	40	638
Горчица	1,04	40	452
Пальмовое масло	20	49	3000

Вместе с тем этанол и биодизель получаются по относительно простым и доступным технологиям так называемого второго поколения [20].

Технологии производства биотоплива второго поколения достаточно хорошо изучены:

- получение биоэтанола из целлюлозного сырья;
- термохимические процессы и связанные с ними каталитические технологии для получения широкого спектра биотоплив, включая синтетический дизель и бензин (см. рисунок).



Технология переработки биомассы в моторное топливо

Основные преимущества биотоплива второго поколения над минеральным топливом и над биотопливом первого поколения заключаются в существенном уменьшении выбросов парниковых газов, а также в значительном уменьшении требований к площади сельхозугодий. Кроме того, биотоплива второго поколения обладают лучшими эксплуатационными свойствами для применения в ДВС, чем биотоплива первого поколения.

Принципиальная разница между биотопливом второго и первого поколения – возможность использования более широкого спектра биомасс, в том числе и относительно дешевых. Источники биомассы включают: непищевую, предназначенную для получения энергии (дрова), остатки сельскохозяйственного производства (солома), отходы лесозаготовок и деревообработки (обрубки, опилки, кора) и т. д. Биотоплива второго поколения требуют в 2–3 раза меньше земли по сравнению с первым поколением (табл. 2).

Таблица 2

Максимально возможный выход биотоплив первого и второго поколений и энергии с 1 га в странах с благоприятным климатом

Поколение биотоплив	Биотоплива	Выход, л/га	Энергия, ГДж/га
Первое	Биодизель из:		
	подсолнечника	1000	35,7
	сои	500–700	17,8–25
	рапса	1200	42,8
	Этанол из:		
	зерна	2500	53
	кукурузы	3100	65,7
	сахарной свеклы	5500	116,6
	сахарного тростника	5300–6500	112,4–137,8
Второе	Из эвкалипта:		
	биодизель FT	13500–18000	463,1–617,4
	метанол	49500–66000	772,2–1029,6
	диметиловый эфир	45000–60000	846,0–1128,0

Биотоплива второго поколения могут отличаться от биотоплив первого поколения по химическому составу, имея более высокую энергетическую плотность и другие важнейшие характеристики для современных и перспективных тепловых двигателей. Например, синтетический дизель (табл. 3) значительно лучше по удельной теплоте сгорания, имеет более высокое цетановое число, низкотемпературные свойства, стабильность, минимальное содержание серы и т. п. Кроме того, биотоплива второго поколения хорошо смешиваются с нефтяными (минеральными).

По мнению большинства экспертов и специалистов, участвовавших в исследованиях, проведенных Европейской комиссией по энергетике, ожидается, что через 5–10 лет может наступить активный этап коммерциализации биотоплив второго поколения, поскольку они более предпочтительны не только с экологической точки зрения, но и обладают более высокими физико-химическими и эксплуатационными свойствами. В частности, целлюлозный этанол может сократить выбросы CO_2 почти на 75 % по сравнению с бензином, а топливный этанол из зерна или сахарной свеклы – только на 60 %. Что касается синтетического дизельного топлива (BTL – превращение биомассы в жидкое топливо), то оно уменьшает эмиссию парниковых газов почти на 90 % по сравнению с биодизелем (топливом из растительных масел).

Преимущества технологий производства биотоплив второго поколения очевидны, однако остается ряд вопросов, связанных в основном с уменьшением затрат на их получение [13], [14], [16].

Таблица 3

Сравнение основных свойств топлив для дизелей

Показатель	Биомасса в жидкость (BTL) от NESTE OIL	Газ в жидкость (GTL)	Биодизель FAME (из рапса)	Летнее ДТ
Плотность, кг/м^3, 15 °С	775–785	77–785	885	835
Вязкость, мм^2/с, 40 °С	2,9–3,5	3,2–4,5	4,5	3,5
Цетановое число	80–99	73–81	51	53
Удельная теплота сгорания, МДж/кг	44,0	43,0	37,5	42,7
Содержание ароматических веществ, %	0	0	0	30
Содержание кислорода, %	0	0	11	0
Содержание серы, мг/кг	<10	<10	<10	<10
Температура помутнения, °С	-5...-25	0…-25	-5	-5

Термохимические технологии имеют преимущества, поскольку позволяют производить углеводороды, в том числе для получения синтетических бензинов и дизельных топлив, которые абсолютно совместимы с существующими минеральными, что важно для развития инфраструктуры производства и сбыта, с учетом применения на транспорте смесевых топлив (биоминеральных смесей).

Термохимические технологии для производства биотоплива второго поколения могут включать:

1. Газификацию биомассы для генерации синтетического газа [4], [19];
2. Пиролиз, на практике мгновенный пиролиз, для производства пиролизного масла (биомасла);
3. Гидротермическую обработку влажной биомассы (HTU);
4. Синтез Фишера – Тропша (FT) углеводородов из синтетического газа с соответствующими процессами его перегонки и обработки;
5. Синтез метанола с последующим синтезом бензина и/или дизельного топлива при помощи технологии метанол в олефин, бензин или дизель (MOGD) или метанол в бензин (MTG).

В ряде европейских стран (Финляндия, Нидерланды, Германия) в течение последнего десятилетия проводятся активные исследования, реализуются пилотные проекты и разработки, анализируются основные препятствия и пути их преодоления, прогнозируются приблизительные временные рамки коммерциализации (освоения) технологий биотоплива второго поколения, в частности термических и каталитических технологий. Так, компания Choren Industries построила пробную установку SunDiesel мощностью 13 тысяч тонн в год и планирует создание установок мощностью 200 тысяч тонн в год [16]. Они еще не обладают достаточной производительностью, чтобы серьезно повлиять на рынок моторных топлив, но их опыт работы позволяет получить ценную научно-техническую информацию для более широкого распространения биотоплив.

Следует также отметить, что устойчивое, надежное и эффективное обеспечение сырьем для установок промышленного масштаба может быть серьезной проблемой и потребует ряда организационных мер [8], [16] для оптимизации финансовой, углеродной и энергетической составляющей затрат. Например, для Англии основными затратами, определяющими стоимость биотоплива второго поколения, являются затраты на сбор, обработку и транспортировку сырья [16], [18]. Другой достаточно значимой частью затрат являются затраты на сам производственный процесс газификации и стоимость установки FT. К снижению затрат, возможно, приведет увеличение объемов производства на установках с высокой производительностью, что, в свою очередь, тесно связано с устойчивым обеспечением сырьем в очень больших объемах.

По нашему мнению, скорее всего именно эти факторы могут привести к вынужденным ограничениям в расширении рынка биотоплив второго поколения. Очевидно, что уже на первом этапе потребуются крупные капитальные вложения, что не только скажется на цене конечного продукта, но и представляет инвестиционный риск.

ВЫВОДЫ

Одной из приоритетных задач, связанной с широким применением биотоплив, является уменьшение выбросов CO_2. Но кроме решения этой задачи в качестве важных факторов продвижения биотоплив на рынок должны быть рассмотрены и другие их преимущества, такие как локальная энергетическая безопасность, высокие экологические характеристики, возобновляемость и диверсификация энергоносителей. Безусловно, что сегодня важное значение имеют формирование общественного мнения, экспертиза, методология, финансовые и регулирующие механизмы, создание инфраструктуры альтернативных энергоносителей. Кроме того, необходимо понимать, что выбор стратегий и технологий производства и потребления биотоплив второго и последующих поколений потребует оптимального использования ресурсов: финансовых, земельных, биомассы, исследовательских, социальных в региональном, национальном и/или глобальном масштабе.

В европейских национальных стратегиях снижения выбросов парниковых газов, в частности CO_2, значительное место занимают меры, стимулирующие использование биотоплив. Новое поколение биотоплив предполагает значительное сокращение выбросов парниковых газов по более низкой цене, хотя оставляет много неопределенностей. Очевидно, не обойтись без поддержки исследований и развития рынка биотоплив на государственном уровне. В связи с крайней нестабильностью на рынке углеводородов, скачками цен на нефть страны Еврозоны, США с целью повышения энергетической безопасности предпринимают комплекс мер для реализации поставленных целей и активизации научно-исследовательских работ.

Становится вполне очевидным, что стимулы для разработки биотоплив всех поколений следует увязывать также с показателями эффективности всех энергозатрат и снижения выбросов CO_2 за весь период жизненного цикла (well-to-wheel) «от скважины до колеса».

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев С. В., Давыдков Г. А. Прогресс и перспективы применения топливного этанола на транспорте // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 9 (103). С. 76–80.
2. Беляев С. В., Давыдков Г. А. К вопросу применения альтернативных топлив в условиях крупных городов. М.: ВИНИТИ, 2010.
3. Беляев С. В., Давыдков Г. А. Проблемы и перспективы применения газомоторных топлив на транспорте // Труды ЛИФ. Вып. 8. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. С. 13–16.
4. Беляев С. В., Давыдков Г. А. К вопросу газофикации биомассы // Леса России в 21 веке: Материалы шестой междунар. науч.-техн. Интернет-конференции. Санкт-Петербург, 2011. СПб.: СПбГЛУ, 2011.
5. Беляев С. В., Давыдков Г. А. Этанол как моторное топливо // Автомобильная промышленность. 2011. № 4.
6. Беляев С. В., Давыдков Г. А., Кильпеляйнен С. А. Прогресс и перспективы развития экологических стандартов для автомобильных двигателей. М.: ВИНИТИ, 2010.
7. О проблемах производства биотоплива в мире // БИКИ № 8118872, 21.07.2005. С. 12–14.
8. Соколов А. П., Герасимов Ю. Ю. Алгоритм синтеза оптимального транспортного плана в системе поддержки принятия решений для лесопромыленного комплекса и биоэнергетики // Труды ЛИФ. Вып. 8. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. С. 144–149.
9. Alternative fuel systems [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://altfuel.com
10. Bioethanol and the Ethanol Industry today. US. DOE. Biomass Program [Electronic resource]. Access mode: http://www.DOE.BiomassPublications.htm
11. Biofuels for Sustainable Transportation [Electronic resource]. Access mode: http://www.IEA.org
12. Biofuels for transport [Electronic resource]. Access mode: http://www.IEA.org/books
13. Biofuels in the European Union a vision for 2030 and beyond. Final draft report of the Biofulels Research Advisory Council. 2006. 31 p.
14. Biofuels, the Next Generation. EU news [Electronic resource]. Access mode: http://euractiv.com/en/energy/biofuels
15. Brusstar M. Sustainable Technology Chooses for Alternative Fuels. USAF / International symposium on Alcohol Fuels. September, 2005.
16. DTI. Global Watch Mission Report. Second generation transport biofuels – a misson to the Netherlands, Germany and Finland. March, 2006.
17. Evans G. International Biofuels Project. Liquid Transport Biofuels Technology Status. Report. NNFCC 08-017. National Non-Food Crops Centre, 2008.
18. Forest land sustainability and second generation biofuels. Informal meeting of Environmental ministers. Ljubljana, 2008.
19. Paisley M. A., Overend R. P., Welch M., Igoe B. M. FERCO's Silva gas biomass gasification process commercialization opportunities for power, fuels and chemicals // Proc. of Second World Biomass Conference, 10–14 May 2004, Rome, Italy.
20. The Biodiesel Hadbook. Champaign. Illinois: AOCS Press, 2005. 302 p.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Технические науки** **2012**

УДК 674.02

ЛЮДМИЛА АНАТОЛЬЕВНА ДЕВЯТНИКОВА
инженер кафедры систем автоматизированного проектирования строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
lud_dev@mail.ru

ЕЛЕНА ГЕННАДЬЕВНА ЕМЕЛЬЯНОВА
кандидат экономических наук, доцент кафедры организации строительного производства строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
zhenemel@mail.ru

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ НА ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ КОМБИНАТАХ*

Рассмотрены вопросы ресурсосбережения на стадии древесно-подготовительного цикла целлюлозно-бумажного комбината. Определены возможности снижения затрат на сырье за счет оптимального соотношения доли коротком еров в общем объеме перерабатываемых балансов на примере одного из комбинатов. Акцент сделан на рассмотрении двух звеньев наиболее распространенной в настоящее время технологии древесно-подготовительного производства целлюлозно-бумажного комбината, которыми являются окорка сырья и производство щепы из короткомерных балансов. Предложены пути снижения потерь древесины за счет оптимизации процесса подготовки сырья для рубительной машины.

Ключевые слова: ресурсосбережение, длина бревен, раскрой, щепа, качество щепы

Древесно-подготовительный цикл целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК) представляет собой цепочку технологических звеньев, на входе которой – круглые неокоренные лесоматериалы, а на выходе – технологическая щепа. Качество технологической щепы является ключевым фактором, определяющим конкурентоспособность конечной продукции ЦБК. В свою очередь, качество щепы зависит от того, насколько совершенными являются звенья древесноподготовительного цикла и их технологическая согласованность. В современных условиях актуальным является не только повышение качества выпускаемой продукции, но и экономия ресурсов на каждой из технологических стадий производственного процесса. Технологические аспекты данной проблемы рассмотрены в статьях [5], [8], [9]. Технико-экономические аспекты той же проблемы представлены в данной статье.

Одним из направлений ресурсосбережения для российских производителей целлюлознобумажной продукции становится работа с издержками, то есть текущими затратами на сырье, эксплуатацию технологического оборудования, электроэнергию, оплату труда персонала и т. п.

Решить проблему уменьшения затрат и повышения конкурентоспособности возможно двумя основными способами: повышение качества целлюлозно-бумажной продукции и снижение затрат на уже производимую целлюлознобумажную продукцию с определенным достигнутым уровнем качества. На практике в большинстве случаев применяется первый способ, и повышение качества целлюлозно-бумажной продукции достигается путем модернизации основного производства. Этот подход является достаточно эффективным, и на ряде предприятий целлюлозно-бумажного производства (ЦБП) процесс модернизации проходит успешно, хотя и не так быстро. Второй способ в целлюлознобумажной промышленности применяется редко. Это обусловлено тем, что в отраслях промышленности, связанных с глубокой переработкой древесины, наибольшее место в производственных затратах занимают расходы на древесное сырье с учетом транспортных расходов и затрат на топливно-энергетические ресурсы. Суммарная величина этих затрат, по проведенным расчетам, может достигать 40–45 % от общих затрат. Например, в ЦБП затраты на сырье и топливно-энергетические ресурсы (ТЭР) составляют 25,8 и 19,4 % соответственно [13], [14], [19]. Поэтому приоритетным направлением повышения эффективности работы предприятий лесопромышленного комплекса является уменьшение затрат на производство древесного сырья, транспортные расходы и ТЭР. Снижение затрат на производство сырья для ЦБП является проблемой сложной и многоплановой.

Окорка сырья является самым дорогим процессом в подготовке древесного сырья [20]. Недостатки окорки балансов в корообдирочных барабанах специалистам хорошо известны и связаны со сложностью технологии, высокой капиталоемкостью и энергоемкостью производства, трудностями утилизации коры. Кроме того, имеет место повышенный износ дорогостоящего корообдирочного оборудования. По нашим данным, на одном из ЦБК толщина стальных стенок корообдирочного барабана в течение 12 лет уменьшается с 32 до 6 мм по причине абразивного и коррозионного износа, что приводит к достаточно большим затратам на ремонт оборудования и вынужденным простоям.

На ЦБК имеется опыт очистки от коры длинномерных и короткомерных круглых лесоматериалов. Исследования [2], [6], [9], [11] показывают, что в корообдирочном барабане древесина сортиментов длиной 0,8 м и менее (так называемые короткомеры) повреждается в существенно большей степени, чем древесина балансов, длина которых равна 1,2 м и более. Это объясняется тем, что древесина в примыкающих к торцам областях на отрезках, примерно равных диаметру, подвергается разрушающему воздействию сил контактного взаимодействия при очистке от коры. Наблюдаемые после окорки повреждения древесины вблизи торцов балансов приводят к появлению некондиционной щепы при дальнейшей переработке балансов в рубительной машине.

Проблемы, связанные с производством щепы из короткомерных балансов, рассмотрены в работах [4], [10]. Щепа, вырабатываемая рубительной машиной, при последнем резе баланса практически всегда короче требуемой и очень часто уходит в отходы. Поэтому, чем короче длина баланса, тем больше «последних резов» при переработке сырья и тем выше потери древесины. Минимальные потери древесины могут быть достигнуты при измельчении сырья длиной, равной длине хлыста. Но размеры круглых лесоматериалов, поступающих на ЦБК, имеют различные размеры, по этой причине после раскроя на слешерной установке появляются некондиционные отрезки, длина которых меньше 0,8 м.

Негативное влияние короткомеров на изменение качественных показателей операций древесно-подготовительного цикла рассматривалось в работах [4], [5], [7], [9]. Влияние короткомеров в общем массиве балансов на качество получаемой щепы проверено экспериментально на ЦБК. Цели, методика и результаты эксперимента представлены в статье [10]. Согласно полученным данным, наибольшее количество технологической кондиционной щепы получается из балансов длиной от 1,2 до 2,5 м. При добавлении к ним короткомеров уменьшается выход технологической щепы, при этом увеличивается выход крупной некондиционной щепы и мелких некондиционных фракций. Согласно ГОСТ 15815-83 «Щепа технологическая. Технические условия» в щепе марки Ц1 доля крупной фракции не должна превышать 3 %, но по проведенным экспериментальным исследованиям, этот показатель составил 3,3 %, то есть превышение доли крупной щепы, получаемой только с одной рубительной машины, по сравнению с допустимыми значениями составило 0,3 %. Для того чтобы достичь нормативных значений, крупная щепа должна поступать на дополнительное измельчение и возвращаться в общий поток. Так, доизмельчение крупной фракции щепы в дезинтеграторе позволяет вовлечь в технологический процесс 60 % крупной щепы [3], но при этом, соответственно, увеличиваются расходы на электроэнергию, эксплуатацию, обслуживание и износ оборудования. В рамках данной работы этот вопрос не рассматривается.

Форма и размеры частиц щепы для варки целлюлозы имеют большое значение. При малых размерах щепы улучшается пропитка и нагрев, но ухудшаются механические свойства целлюлозы как результат повреждения древесных волокон. Напротив, варка крупной щепы дает целлюлозу с высокими прочностными свойствами, но с неравномерным проваром и повышенным содержанием непровара. Выход целлюлозы из древесины зависит главным образом от степени провара целлюлозы. Чем в большей степени проварена целлюлоза, тем больше расход балансов, и наоборот [14], [15].

Согласно данным [19], потери древесины в расчете на 1 млн $м^3$ перерабатываемых однометровых балансов по сравнению с переработкой хлыстов составляют около 40 тыс. $м^3$ (4 %). Чтобы выразить потери древесины в денежном эквиваленте, возьмем за основу среднюю цену производителей одного кубометра круглого леса (еловой балансовой древесины) в Северо-Западном федеральном округе (на декабрь 2011 года эта цена составила 1233 руб.) [12]. Тогда получим $40\,000$ $м^3 \times 1233$ руб./$м^3 = 49\,320\,000$ руб. на 1 млн $м^3$ перерабатываемых однометровых балансов в виде убытков или упущенных возможностей за счет потерь древесины. В разрезе предприятий Республики Карелия ситуация в отрасли определяется практически целиком двумя мощными ЦБК в Кондопоге и Сегеже. Каждое предприятие рассчитано на переработку приблизительно 2,5 млн $м^3$ древесины в год [16]. Сделав несложные расчеты, определим упущенные возможности каждого из этих предприятий: $49{,}32 \times 2{,}5 = 123{,}3$ млн руб. в год. В этих расчетах принято, что переработке подлежат только еловые балансы длиной 1 м (± 0,2 м). Но в реальных производственных условиях ЦБК, где наряду с однометровыми балансами присутствует доля короткомеров в общем потоке балансов, поступающих на рубительную машину, потери древесины, как указано выше, будут еще больше.

Рассмотрим пример Кондопожского ЦБК, на базе которого проводились экспериментальные исследования [5], [10]. При производстве щепы использовалось сырье, состоящее из однометровых балансов и короткомеров. По наблюдениям, длина короткомеров составляет от 0,10 до 0,80 м.

Для расчетов примем среднюю длину коротко-мера – 0,45 м, то есть примерно половина одно-метрового баланса. Логично предположить, что и потери древесины увеличатся вдвое и составят 80 тыс. $м^3$ в расчете на 1 млн $м^3$ перерабатываемых балансов. По данным эксперимента, доля короткомеров в общем массиве перерабатываемых на щепу балансов варьировалась от 38 до 68 % [5].

Если доля короткомеров 38 %, то доля балансов составит 62 % и потери древесины: 0,38 × 80 тыс. $м^3$ + 0,62 × 40 тыс. $м^3$ = 55 тыс. $м^3$ на 1 млн $м^3$ перерабатываемых балансов.

Если доля короткомеров 68 %, то доля балансов будет равна 32 % и потери древесины составят: 0,68 × 80 тыс. $м^3$ + 0,32 × 40 тыс. $м^3$ = 67,2 тыс $м^3$ на 1 млн $м^3$ перерабатываемых балансов.

Чтобы представить объемы потерь древесины в рамках отдельного комбината, необходимо обратиться к производственным данным. Комбинат в 2010 году произвел 113,6 тыс. т целлюлозы по варке [17], следовательно, получим ориентировочно 568 тыс. $м^3$ древесины, перерабатываемой на щепу, учитывая, что фактический расход древесины в зависимости от ее породы и качества составляет 4,5–5,0 пл. $м^3$/т целлюлозы [15]. При таком объеме производства потери древесины составят:

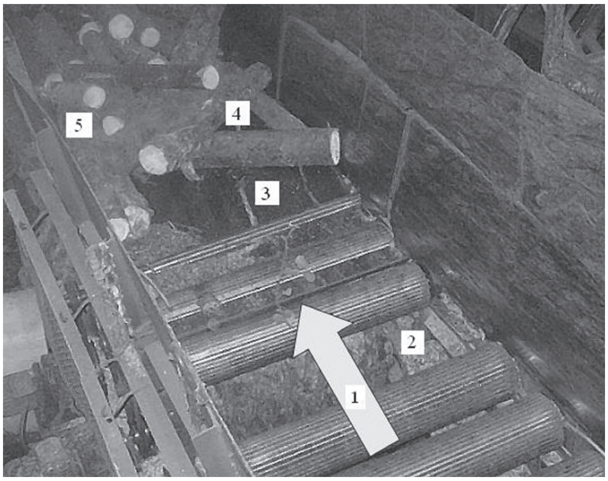
- для доли короткомеров 38 %: 55 × 0,568 = 31,24 тыс. $м^3$;
- для доли короткомеров 68 %: 67,2 × 0,568 = 38,17 тыс. $м^3$.

С учетом объема производства (568 тыс. $м^3$ древесины, перерабатываемой на щепу в год) и средней цены производителей одного кубометра круглого леса (еловой балансовой древесины) в Северо-Западном федеральном округе 1233 руб., убытки или упущенные возможности составят:

- при доле короткомеров 38 %: 1233 руб. × 31,24 тыс. $м^3$ = 38 млн 519 тыс. руб. в год;
- при доле короткомеров 68 %: 1233 руб. × 38,17 тыс. $м^3$ = 47 млн 64 тыс. руб. в год.

Таким образом, уменьшив долю короткомеров в массиве балансов с 68 до 38 %, получим не только щепу лучшего качества, но и сокращение потерь древесины в 38,17/31,24 = 1,2 раза и сокращение убытков с 47,064 до 38,519 млн руб. в год. Это ожидаемый экономический эффект.

Данные потери можно уменьшить за счет оптимизации процесса подготовки сырья для рубительной машины. Такая оптимизационная работа уже осуществляется на ЦБК на стадии транспортировки пиленой древесины в корообдирочный барабан. Для отбраковки короткомеров предусмотрены провалочные окна на рольгангах. Однако, по нашим наблюдениям процесса транспортировки балансов на одном из ЦБК, часть короткомеров не проваливается в эти окна и поступает на дальнейшую обработку в корообдирочный барабан (см. рисунок). Эти данные указывают на необходимость модернизации секций рольганга.



Участок рольганга с провалочным окном для удаления короткомеров: 1 – направление движения сырья к корообдирочному барабану; 2 – провалочное окно для удаления короткомеров; 3 – ленточный конвейер; 4 – балансы стандартной длины; 5 – неудаленный короткомер

В качестве модернизации на стадии транспортировки можно предусмотреть изменение конструкции роликов конвейера с целью создания циклически повторяющихся вертикальных перемещений транспортируемых лесоматериалов. Это предположительно даст технический эффект, выражающийся в повышении эффективности автоматической сортировки по длине перемещаемых с помощью рольганга лесоматериалов, то есть в более качественной отбраковке короткомеров для предотвращения их попадания на дальнейшую обработку. Техническая реализация такой модернизации рольганга вполне осуществима и не требует больших затрат [18]. Описанная модернизация наиболее целесообразна и менее затратна именно на этой стадии, до загрузки в корообдирочный барабан, что способствует не только повышению экономической эффективности производства, но и отвечает современным экологическим требованиям.

ВЫВОДЫ

1. При существующей технологии подготовки древесины уменьшение доли короткомеров в массиве балансов с 68 до 38 % позволит сократить потери древесины в 1,2 раза. При этом отбракованные после стадии раскроя короткомеры могли бы быть использованы, например, в качестве топлива, в производстве строительных конструкций, в элементах параметрической архитектуры.

2. На одном из ЦБК с годовым выпуском 113,6 тыс. т целлюлозы по варке, уменьшив долю короткомеров в общем массиве балансов с 68 до 38 %, можно получить не только щепу лучшего качества, но и сокращение убытков по потерям древесины с 47,064 до 38,519 млн руб. в год.

3. Доля коротkомеров может быть уменьшена на стадии транспортировки балансов за счет совершенствования конструкции провалочных окон на рольгангах.

4. Переработку продуктов раскряжевки целесообразно вести раздельно, используя специальное оборудование для производства щепы из коротkомеров.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойков С. П. Теория процессов очистки древесины от коры. Л.: ЛГУ, 1980. 152 с.
2. Вальщиков Н. М., Лицман Э. П. Рубительные машины. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 96 с.
3. Васильев С. Б. Комплексные исследования процесса производства щепы // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. С. 13–15.
4. Васильев С. Б., Вдовин А. А., Гусев А. В. Обоснование рациональных режимов переработки отходов раскряжевки и крупной фракции щепы // Научно-методическое обеспечение лесного комплекса Карелии: Тез. докл. науч.-практ. конф. докторантов и аспирантов лесоинженерного факультета ПетрГУ. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. С. 16–17.
5. Васильев С. Б., Девятникова Л. А., Колесников Г. Н. Влияние технологии раскроя балансовой древесины на фракционный состав щепы // Известия СПбЛТА. 2011. Вып. 195. С. 125–133.
6. Васильев А. С., Никонова Ю. В., Раковская М. И. Математическое моделирование технологического процесса очистки древесины в корообдирочном барабане // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 1. С. 117–119.
7. Газизов А. М., Шапиро В. Я., Григорьев И. В. Влияние влажности на развитие процесса разрушения коры при роторной окорке // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2008. № 6. С. 129–133.
8. Герасимов Ю. Ю., Селиверстов А. А., Суханов Ю. В., Сюнёв В. С. Основные факторы планирования производства древесного топлива из древесной биомассы // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер.: «Естественные и технические науки». 2011. № 8 (121). С. 77–80.
9. Девятникова Л.А. Комплекс задач по совершенствованию технологии и оборудования древесно-подготовительного цикла для производства целлюлозы // Леса России в XXI веке: Материалы 5-й Междунар. науч.-практ. интернет-конф. СПб.: СПбЛТА, 2010. С. 151–158.
10. Девятникова Л. А., Васильев С. Б., Колесников Г. Н. Влияние технологии раскроя балансов на фракционный состав щепы // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2012. № 3. С. 120–124.
11. Девятникова Л. А., Никонова Ю. В. О совершенствовании технологии очистки круглых лесоматериалов от коры и их переработки на щепу // Материалы четвертой международной научно-практической Интернет-конференции «Леса России в XXI веке». СПб.: ЛТА, 2010. С. 111–114.
12. Ежемесячный ценовой обзор «Круглый лес». 2012. Вып. № 37 (46) [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.lesprom.com
13. ЗАО «ЭКСПО-Трейд» Технологическая щепа высокого качества с минимальными затратами? Гарантируем! // Журнал «ЛесПромИнформ». 2009. № 4 (62). С. 74–76 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://lesprominform.ru/jarchive/articles/itemshow/694
14. Иванов К. А. Влияние качества щепы на величину и вариацию характеристик сульфатной целлюлозы: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Архангельск, 2009. 141 с.
15. Комплексная химическая переработка древесины: Учебник для вузов / И. Н. Ковернинский, В. И. Комаров, С. И. Третьяков, Н. И. Богданович, О. М. Соколов, Н. А. Кутакова, Л. И. Селянина; Под ред. И. Н. Ковернинского. Архангельск: Изд-во Архангельского гос. техн. ун-та, 2002. 347 с.
16. Кузьминов И. Ф. Республика Карелия: современное состояние и перспективы развития лесопромышленного комплекса, 2011 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.wood.ru/ru/loa767.html
17. Официальный сайт ОАО «Кондопога» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.oaokondopoga.ru/index.html
18. Патент на полезную модель 117411 РФ, МПК B65G 13/11. Секция рольганга для сортировки транспортируемых лесоматериалов по длине. Колесников Г. Н., Васильев С. Б., Девятникова Л. А., Доспехова Н. А.
19. Суханов В. С. О повышении эффективности работы ЦБК за счет снижения затрат на производство сырья // Журнал «ЛесПромИнформ». 2005. № 3 (25).
20. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Гулько А. Е. Анализ методов расчета параметров и обоснование математической модели разрушения коры при групповой окорке древесины // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 8 (121). С. 92–96.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Технические науки** **2012**

УДК 676.051.054

ЮЛИЯ ВАСИЛЬЕВНА НИКОНОВА
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры систем автоматизированного проектирования строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
juli4455@mail.ru

МАРИНА ИВАНОВНА РАКОВСКАЯ
кандидат технических наук, доцент кафедры механики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
mirrows@yandex.ru

КИРИЛЛ ДМИТРИЕВИЧ РОЙ
студент 3-го курса строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
roydk@yandex.ru

ПОПЕРЕЧНАЯ ЖЕСТКОСТЬ КРУГЛЫХ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ: ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ*

Представлены материалы ранее выполненных исследований, которые связаны с определением сил контактного взаимодействия балансов, подвергаемых очистке в корообдирочном барабане. Под балансом понимается имеющий стандартную длину (1,2 м) отрезок ствола дерева. Балансы используются в качестве сырья при производстве древесной щепы. Основное внимание уделяется вопросам определения жесткости балансов.

Ключевые слова: балансы, жесткость, математическая модель, силы контактного взаимодействия, корообдирочный барабан

Постановка задачи. Жесткость определяется в механике как способность упругого тела сопротивляться появлению деформаций (растяжения, сжатия, изгиба, сдвига, кручения) [11]. Представляет интерес зависимость жесткости баланса от величины его диаметра, от модулей упругости коры и древесины, возраста, влажности и других физико-математических характеристик. Мерой жесткости служит отношение силы к той деформации, которая вызывается ее действием. При малых деформациях (в пределах закона Гука) эта зависимость линейна.

В математической модели соударений балансов в процессе их очистки в корообдирочном барабане используется понятие «жесткость при сжатии». Под этим понимается коэффициент пропорциональности между силой, действующей на баланс, и соответствующим ей линейным перемещением. Более того, поскольку соударения балансов сопровождаются образованием так называемого пятна контакта, указанная жесткость может приводиться к единице его длины и иметь размерность (Н/м)/м) = Н/м^2. В дальнейшем изложении следует различать жесткость баланса и его погонную жесткость, то есть жесткость, отнесенную к единице длины.

При моделировании соударений балансов в процессе их очистки в корообдирочном барабане необходимо принимать во внимание, что кора и остальная часть баланса существенно различаются по жесткости. Различия в жесткости материалов характеризуются модулями упругости, которые определяются экспериментально. Наиболее детально исследованы механические свойства древесины [1], [5], [9]. Менее детально исследованы механические свойства коры [2]. В еще меньшей степени изучены вопросы, связанные с определением жесткости баланса как системы, образованной совместно деформируемыми корой и остальными частями древесного ствола.

Экспериментальное определение жесткости еловых балансов. В качестве объекта экспериментального исследования выбраны еловые балансы. Образцы естественной влажности в виде отрезков бревен длиной 1 м были заготовлены в октябре 2008 года на одном из предприятий лесопромышленного комплекса в деревне Шокша Вепской национальной волости Республики Карелия. Испытания выполнены в октябре 2008 года на машине Р-10 с приложением нагрузки в радиальном направлении (рис. 2).

Зависимость сближения точек *A* и *B* от величины силы *P* (рис. 1) отображалась на диаграмме (рис. 2).

Образцы не доводились до разрушения, испытания проводились в условно упругой стадии, что подтверждалось почти прямо пропорциональной зависимостью сближения точек *A* и *B* от силы *P*.

В процессе испытаний положение образца изменялось его поворотом на 90^0 вокруг продольной оси и цикл указанных выше измерений повторялся. Было найдено, что сила, вызывающая сближение точек *A* и *B* (рис. 1) на 1 мм, равна 1360 Н для баланса диаметром 14,6 см, число годовых колец которого равно 81. Для баланса диаметром 23 см с числом годовых колец 147 значение этой силы возросло до 5000 Н, что является закономерным, поскольку жесткость материала древесного ствола с возрастом увеличивается.

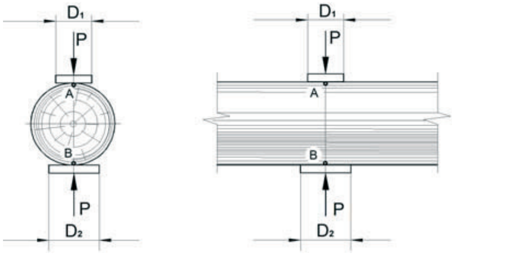


Рис. 1. Схема испытаний

Рис. 2. Общий вид установки для испытаний

Интерпретация результатов измерений. Для интерпретации результатов измерений воспользуемся упрощенной схемой (рис. 3).

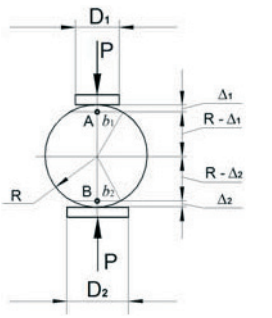


Рис. 3. К интерпретации результатов измерений

Аналогичные схемы применяются в исследованиях контактного взаимодействия цилиндрических тел методами теории упругости [10]. Из схемы на рис. 3 следует, что

$$\Delta_1 = R - \sqrt{R^2 - b_1^2}. \qquad (1)$$

Преобразуем выражение (1) к виду:

$$\frac{\Delta_1}{R} = 1 - \sqrt{1 - (b_1/R)^2}. \qquad (2)$$

Тогда $1 - (b_1/R)^2 = 1 + (\Delta_1/R)^2 - 2(\Delta_1/R)$, (3)

$$(b_1/R)^2 = 2(\Delta_1/R) - (\Delta_1/R)^2. \qquad (4)$$

По физическому смыслу задачи можно считать, что $\Delta_1 \ll R$, то есть $\Delta_1/R \ll 1$. Пренебрегая в (4) величиной $(\Delta_1/R)^2$, получаем:

$$b_1^2 = 2\Delta_1 R. \qquad (5)$$

Аналогично, используя ту же схему (рис. 3), запишем:

$$b_2^2 = 2\Delta_2 R. \qquad (6)$$

Величинами b_1 и b_2 приближенно определяется ширина области контакта, которая определяется методами теории упругости [10].

Если воспользоваться упрощенной моделью баланса, рассматривая его как однородный цилиндр из изотропного материала с модулем упругости E и коэффициентом Пуассона $\mu = 0{,}3$, то для контакта цилиндра с плоской поверхностью величина b_1 будет равна [10]:

$$b_1 = 1{,}52\sqrt{\frac{\overline{P}_1 R}{E}}. \qquad (7)$$

Здесь $\overline{P}_1$ – нагрузка на единицу длины поверхности контакта. В нашем случае (рис. 3) нагрузка на баланс передавалась через жесткие диски диаметром D_1 и D_2. Принимая во внимание, что $b_1 \ll D_1$, определим площадь контакта как площадь узкого прямоугольника шириной $2b_1$ и длиной D_1. Тогда нагрузка на единицу длины контакта

$$\overline{P}_1 = \frac{P}{D_1}. \qquad (8)$$

Аналогично

$$b_2 = 1{,}52\sqrt{\frac{\overline{P}_2 R}{E}}. \qquad (9)$$

$$\overline{P}_2 = \frac{P}{D_2}. \qquad (10)$$

Исключая b_1 из равенств (5) и (7), найдем:

$$\Delta_1 = 1{,}16\frac{\overline{P}_1}{E}. \qquad (11)$$

Аналогично, подставив (9) в (6), найдем:

$$\Delta_2 = 1{,}16\frac{\overline{P}_1}{E}. \qquad (12)$$

Соотношения (11) и (12) позволяют сделать важный в практическом отношении вывод: при моделировании соударений балансов в корообдирочном барабане влиянием поперечных размеров баланса можно пренебречь, если материал всех балансов имеет один и тот же модуль упругости E. Однако необходимы уточнения, обусловленные влиянием возраста древесины, а значит, и диаметра, на модуль упругости E.

С применением (11) и (12) найдено, что сила 1360 Н вызывает сближение точек A и B (рис. 1) на величину $\Delta = 1$ мм, что означает:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2. \qquad (13)$$

Величины Δ_1 и Δ_2 прямо пропорциональны величинам P_1 и P_2:

$$\Delta_1/\Delta_2 = \overline{P}_1/\overline{P}_2. \qquad (14)$$

Учитывая (8) и (10), запишем:

$$\Delta_1/\Delta_2 = D_2/D_1. \qquad (15)$$

Поскольку $\Delta_2 = \Delta - \Delta_1$, преобразуем отношение (15):

$$\Delta_1(D_1 + D_2) = D_2\Delta. \tag{16}$$

$$\Delta_1 = D_2\Delta/(D_1 + D_2). \tag{17}$$

В рассматриваемых случаях $D_1 = 9{,}5$ см, $D_2 = 14{,}5$ см, $\Delta = 0{,}1$ см. Тогда:

$$\Delta_1 = 14{,}5 \cdot 0{,}1/(9{,}5 + 14{,}5) = 0{,}0604 \approx 0{,}6 \text{ мм},$$
$$\Delta_2 = 0{,}1 - 0{,}0604 \approx 0{,}4 \text{ мм}.$$

Представим баланс состоящим из двух полуцилиндров. По определению, погонная жесткость S_1 верхней половины сечения баланса (рис. 3) равна:

$$\bar{S}_1 = S_1 / D_1. \tag{18}$$

Учитывая жесткость той же части $S_1 = P_1/\Delta_1$, получим:

$$\bar{S}_1 = \frac{P}{D_1\Delta_1} = \frac{136}{0{,}0604 \cdot 9{,}5} = 2370\frac{H}{см^2}. \tag{19}$$

Аналогично

$$\bar{S}_2 = \frac{P}{D_2\Delta_2} = \frac{136}{0{,}0396 \cdot 14{,}5} = 2370\frac{H}{см^2}. \tag{20}$$

Величины (19) и (20) получены для баланса диаметром 14,5 см. Испытания баланса диаметром 23 см по техническим условиям были выполнены на другой установке. Нагрузка на баланс передавалась через две одинаковые плиты длиной 28 см каждая. При этом было установлено, что сила 5000 Н вызывает сближение точек А и В на 1 мм. Это означает, что $\Delta_1 = \Delta_2 = 0{,}5$ мм,

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = \frac{500}{0{,}05 \cdot 28} = 3570\frac{H}{см^2}. \tag{21}$$

Определение жесткости баланса с применением методов теории упругости. Погонная жесткость определяется отношением силы к соответствующему этой силе перемещению:

$$\bar{S}_1 = \bar{P}_1/\Delta_1; \quad \bar{S}_2 = \bar{P}_2/\Delta_2. \tag{22}$$

Подставив (11) и (12) в (22), получим:

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = 0{,}86E. \tag{23}$$

Здесь E – приведенный (или усредненный) модуль упругости:

$$E = E_0 E_r/(E_0 + E_r). \tag{24}$$

Здесь E_0 и E_r – модуль упругости соответственно коры и древесины при сжатии в радиальном направлении. Методика измерения и характеристики жесткости коры исследованы А. С. Васильевым [2]. С учетом известных по литературе данных [5] можно приближенно считать, что для еловых балансов $E_r = 0{,}67\,ГПа(67000\frac{H}{см^2}), E_0 \cong E_r/20$. Тогда

$$E = \frac{E_r \cdot E_r}{20(E_r/20 + E_r)} = \frac{E_r}{21}. \tag{25}$$

Подставив (25) в (23), получим:

$$S_1 = S_2 = 0{,}86 \cdot E_r/21 = 0{,}041\,E_r. \tag{26}$$

Если, например, $E_r = (67000 \pm 1340)$ *Н/см²*, то по формуле (26) нижняя оценка погонной жесткости:

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = 0{,}041 \cdot 53600 = 2200\frac{H/см}{см}. \tag{27}$$

Верхняя оценка:

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = 0{,}041 \cdot 80400 = 3300\frac{H/см}{см}. \tag{28}$$

Для перехода от погонной жесткости к обычно используемой в расчетах необходимо величину S_l (28) или (27) умножить на длину пятна контакта.

С учетом вариабельности свойств свежезаготовленной древесины можно сделать вывод о том, что полученные с применением методов теории упругости оценки (27) и (28) достаточно хорошо согласуются с результатами эксперимента (19), (20), (21).

Результаты определения жесткости балансов с использованием программы конечно-элементного анализа. Воспользуемся программой конечно-элементного анализа «Лира-9». С точки зрения механики рассматриваемая проблема формулируется как плоская задача теории упругости, для решения которой применяется метод конечных элементов. Баланс упрощенно рассматриваем как однородное изотропное тело, модуль упругости материала E, коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}3$.

Для определения закономерностей влияния модуля упругости материала и диаметра баланса на его жесткость была выполнена серия расчетов, результаты которых представлены в таблице.

В таблице приведены значения силы, вызывающей сближение точек A и B на 1 см для условного баланса при $D_1 = D_2$ (рис. 1). Расчеты выполнены с использованием модели, в которой число конечных элементов равно 4455, число узлов – 2323, число уравнений метода конечных элементов – 4628.

Результаты, полученные по программе «Лира-9»

Модуль упругости материала (Н/см²)	Диаметр баланса (см)			
	15	20	25	30
2500	576	576	576	576
50000	1152	1152	1152	1152
75000	1728	1728	1728	1728
100000	2304	2304	2304	2304

Полученные результаты численного моделирования (см. таблицу) подтверждают правомерность вывода о том, что диаметр баланса не влияет на величину его деформации в рассматриваемой задаче.

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = \frac{\bar{P}_1}{\Delta_1} = \frac{1152}{0{,}5} = 2304\frac{H}{см^2}.$$

Результаты расчета (см. таблицу) показывают, что округленные до целых значения силы, вызывающей сближение точек A и B на 1 см, не зависят от диаметра цилиндра. Эти данные позволяют записать следующую эмпирическую зависимость:

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = 0{,}046E. \tag{29}$$

Зависимость (29) аналогична ранее полученной зависимости (26), что подтверждает достоверность результатов исследования. Расхождение коэффициентов в (26) и (29) составляет:

$$\varepsilon = \frac{0{,}046 - 0{,}041}{0{,}041} \cdot 100\,\% = 12\,\%. \tag{30}$$

Используя результаты расчета (см. таблицу), вычислим нижнюю и верхнюю оценки жесткости баланса с указанным выше модулем упругости $E = E_r = (53600...80400)$ *Н/см*^{2}. По формуле (29) вычисляем верхнюю оценку:

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = 0{,}046 \cdot 80400 = 3700\ (Н/см)/см. \tag{31}$$

По той же формуле определяем нижнюю оценку:

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = 0{,}046 \cdot 53600 = 24700\ (Н/см)/см. \tag{32}$$

Перемещение Δ_1 (рис. 4) представим в виде суммы:

$$\Delta_1 = \Delta_0 + \Delta_w, \tag{33}$$

где величина Δ_0 обусловлена деформированием коры, а величина Δ_w определяет свойства древесины.

Как указано выше, жесткость

$$S_1 = \bar{P}_1/\varDelta_1. \tag{34}$$

Аналогично

$$S_0 = \bar{P}_1/\varDelta_0;\ S_w = \bar{P}_1/\varDelta_w. \tag{35}$$

Тогда

$$\varDelta_0 = \bar{P}_1/S_0;\ \varDelta_w = \bar{P}_1/S_w. \tag{36}$$

С учетом (33) получаем:

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_0\,\bar{S}_w \,/\, (\bar{S}_0 + \bar{S}_w). \tag{37}$$

Принимая во внимание, что согласно равенству (23) указанные в формуле (37) жесткости прямо пропорциональны соответствующим модулям упругости, приходим к равенству (24).

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика определения жесткости балансов с корой при сжатии в радиальном направлении. Результаты экспериментального и численного определения жесткости балансов согласуются с данными, полученными по формулам теории упругости.

2. Влияние величины только диаметра баланса на его жесткость пренебрежимо мало. Однако диаметр баланса зависит от возраста древесины, а с возрастом изменяется жесткость коры и основной части древесного ствола. Поэтому жесткость баланса оказывается зависящей от возраста. Установлено, что жесткость баланса прямо пропорциональна модулю упругости, но не равна ему (23).

3. Результаты определения жесткости по разработанной методике используются в качестве исходных данных при численном моделировании соударений балансов в процессе их очистки от коры в установках барабанного типа [3], [4], [7], [8], [11]. Кроме того, эта же методика может быть использована для получения исходных данных в расчетах деформаций при проектировании новых и обследовании существующих строений из круглых лесоматериалов.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашкенази Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 224 с.
2. Васильев А. С. Обоснование технических решений, повышающих эффективность режимов групповой окорки древесного сырья: Дис. … канд. техн. наук. Петрозаводск, 2004. 148 с.
3. Васильев А. С., Никонова Ю. В., Раковская М. И. Математическое моделирование технологического процесса очистки древесины в корообдирочном барабане // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 1. С. 117–119.
4. Васильев С. Б., Колесников Г. Н., Никонова Ю. В., Раковская М. И. Влияние локальной жесткости корпуса корообдирочного барабана на изменение силы соударений и величину потерь древесины // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 4(96). С. 84–91.
5. Лесная энциклопедия: В 2 т. М.: Сов. энциклопедия, 1986. Т. 2. 631 с.
6. Никонова Ю. В., Раковская М. И. Методика определения жесткости балансов, результаты численных экспериментов и испытаний образцов // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Вып. 8. Петрозаводск, 2010. С. 100–106.
7. Раковская М. И., Никонова Ю. В. Численное моделирование и определение сил контактного взаимодействия длинномерных сортиментов в корообдирочном барабане // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 1.3(31). С. 397–401.
8. Раковская М. И., Никонова Ю. В., Васильев А. С. Об алгоритме метода дискретных элементов применительно к исследованию технологического процесса очистки древесины в окорочном барабане // Информационные технологии моделирования и управления. 2008. № 1(44). С. 119–124.
9. Тутурин С. В. Механическая прочность древесины. М.: Спутник+, 2007. 311 с.
10. Филин А. П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т. 2. М.: Наука, 1978. 616 с.
11. Шегельман И. Р., Васильев А. С., Колесников Г. Н., Никонова Ю. В. Моделирование технологического процесса очистки древесины в корообдирочном барабане с применением метода дискретных элементов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2008. Вып. 184. С. 172–179.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Технические науки** **2012**

УДК 699.86

ЛЮБОВЬ ФЕДОРОВНА СЕЛЮТИНА
кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
selutinalf@mail.ru

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ В ДОМОСТРОЕНИИ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ*

Приведены сведения об энергоэффективных деревянных конструкциях, наружных газобетонных стенах, трехслойной кирпичной кладке со средним слоем из полистиролбетона, трехслойных железобетонных стеновых панелях. Дается обзор современных энергоэффективных ограждающих конструкций зданий, построенных в Карелии за последние 5 лет.

Ключевые слова: энергоэффективность, каркасное деревянное домостроение, трехслойная кирпичная кладка, железобетонные стеновые панели

Вопрос о сохранении тепла волновал человека с древнейших времен. Особенно остро проблема утепления стояла в северных широтах. Древнескандинавские «длинные дома» строились таким образом, чтобы стены и крышу можно было обложить дерном – такая конструкция уменьшала потери тепла в суровом северном климате. Северные славяне, возводя практически все постройки из дерева, обязательно конопатили стены мхом или паклей, снижая до минимума возможность сквозняков. До начала прошлого века в отдаленных северных районах России избы сооружали с небольшими окнами, вырезая их в ограниченном количестве, чтобы сберечь тепло. Былинные русские терема с подклетями вместо первого этажа, где часто держали скот, – дань не столько эстетике, сколько суровым морозам: чтобы выжить в суровом климате, нельзя было пренебрегать ни одной возможностью согреться [6].

Республика Карелия расположена на северо-западе России, между Белым морем, Ладожским и Онежским озерами. Климат переходный от морского к континентальному, с продолжительной зимой, прохладным летом, влажным воздухом.

Температура воздуха наиболее холодной пятидневки (обеспеченностью 0,92) на юге Карелии (Олонец) – -29 °С, на севере Карелии (Реболы) – -31 °С [3]. В Петрозаводске продолжительность отопительного периода составляет 240 суток; величина градусо-суток отопительного периода – 5544 [4]. Нормируемые значения сопротивления теплопередаче стен – 3,34 $м^2 \cdot °С/Вт$, покрытий – 4,972 $м^{2°} \cdot С/Вт$ [4]. В таких климатических условиях проектирование и эксплуатация энергоэффективных зданий является одной из важнейших приоритетных задач региона. В Карелии построены здания различного функционального назначения с высоким уровнем теплозащиты.

Дерево было и остается традиционным материалом для индивидуального жилищного строительства в республике. Древесина обладает рядом уникальных свойств, которые сделали ее популярной для строительства много веков назад и благодаря которым она остается востребованной сегодня. Низкая теплопроводность древесины позволяет сохранять тепло зимой и прохладу летом. Бревенчатый дом является традиционным для Карелии типом жилья.

Технология строительства из оцилиндрованного бревна пришла в Карелию сравнительно недавно, но за несколько лет приобрела огромную популярность. Оцилиндрованное бревно – современный и технологичный материал. Сруб из оцилиндрованного бревна – конструкция высокой заводской готовности, имеющая точные геометрические размеры, а ровная поверхность стен не нуждается в работах по подгонке и укладке на месте сборки. Специалисты считают, что благодаря этому теплоизоляционные свойства таких бревен выше обычных бревенчатых и из бруса. Известно достаточное количество вариантов стен, но общим требованием для них является устройство скользящего соединения обрешетки с бревнами для компенсации их усадки. На рис. 1 показана конструкция стены из оцилиндрованного бревна с наружным утеплением.

В строительстве *малоэтажных зданий* широко используется технология каркасного деревянного строительства. Данная технология строительства индивидуальных жилых домов является оптимальной для геологических и климатических условий Карелии. Каркас зданий сооружается со стойками на один этаж. Основой дома является деревянный каркас из пиломатериалов толщиной 40–50 мм и шириной 150 мм, установленных с шагом 400–600 мм, и горизонтальных обвязок. Снаружи каркас обшивается цементно-стружечной или ориентировано-стружечной плитой, внутри заполняется утеплителем: каменной ватой (ROCKWOOL), стекловатой (URSA, ISOVER), эковатой. Утеплитель герметично закрывается пароизоляционными пленками, исключающими попадание паров со стороны внутренних помещений. Изнутри по пленке набиваются обрешетка и гипсокартон. Снаружи стена покрывается ветрозащитной мембраной, которая обеспечивает свободный выход паров из стены и служит преградой для ветра и попадания влаги из атмосферы внутрь. Это значительно увеличивает теплоизоляционные свойства стеновой конструкции. Далее следует наружная отделка. Распространены различные варианты наружной отделки зданий. В случае организации вентилируемого фасада это могут быть вагонка, сайдинг, полимерные плиты. На рис. 2 приведено конструктивное решение наружной стены с отделкой виниловым и деревянным сайдингом.

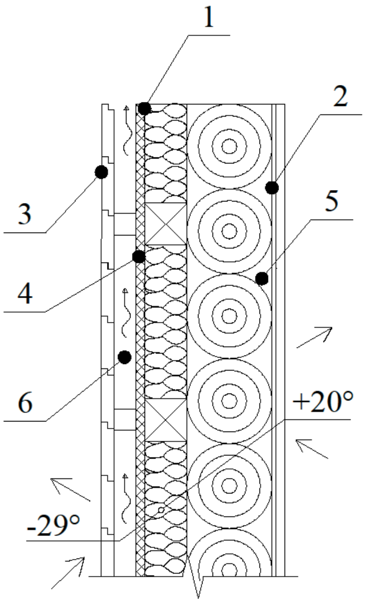


Рис. 1. Конструкция стены из оцилиндрованного бревна с наружным утеплением 1 – минераловатная изоляция ISOVER; 2 – пароизоляция ISOVER; 3 – обшивка; 4 – ветрозащитный материал ISOVER SKL; 5 – теплоизоляция швов ISOVER TK; 6 – воздушный зазор

Экономичность каркасного дома оправдывает себя в тех случаях, когда не планируется длительный срок эксплуатации (100 и более лет).

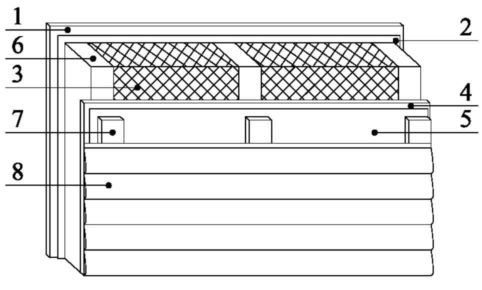


Рис. 2. Конструкция каркасной стены с отделкой виниловым и деревянным сайдингом: 1 – гипсокартон; 2 – пароизоляция; 3 – минеральная вата; 4 – OSB; 5 – ветрозащитная мембрана; 6 – стойка; 7 – обрешетка; 8 – сайдинг

Потери тепла происходят через стены, кровлю и пол. Поэтому при строительстве энергоэффективного дома выполняется тепловой контур. Современные теплоизоляционные материалы позволяют создать надежный барьер, препятствующий потерям тепла. В результате в доме и в холодное, и в жаркое время года сохраняются комфортные температурно-влажностные условия, а снижение тепловых потерь дает возможность экономить до 40 % энергии, расходуемой на отопление.

Утепление скатных кровель и мансард осуществляется путем установки теплоизоляционных плит внутрь несущего каркаса между стропилами. Известны два способа выполнения работ: изнутри и снаружи. Предпочтительнее производить утепление изнутри, то есть после того, как смонтировано кровельное покрытие. Порядок монтажа при утеплении кровли изнутри следующий. Ветрозащитная пленка монтируется на стропила. Для удаления влаги между утеплителем и кровельным покрытием предусматривается воздушный зазор. С наружной стороны кровля закрывается кровельным материалом. В стропила с уже смонтированной ветрозащитной мембраной с внутренней стороны враспор снизу вверх устанавливаются теплоизоляционные плиты. Закрепляется пароизоляционный материал (Изоспан, Строизол и др.). Пароизоляция монтируется по несущим элементам крыши (стропила, балки, арки, фермы). Монтаж пароизоляции ведется от карниза к коньку горизонтальными полотнищами с перекрытием стыков не менее 100 мм, все швы пароизоляции проклеиваются герметизирующими лентами. Разрывы пароизоляционного слоя не допускаются. Пароизоляционная мембрана с внутренней стороны крепится деревянными рейками или металлическими направляющими обрешетки. Далее монтируется финишная отделка. На рис. 3 представлена эффективная конструкция скатной крыши.

Хорошие теплоизолирующие свойства кровли, стен и перекрытий обеспечиваются высококачественными утеплителями, способными в составе конструкций здания продолжительное время сохранять свои свойства, размеры и форму. Всем этим требованиям отвечают минераловатные утеплители PAROC, ROCKWOOL, ISOVER, URSA и др. Благодаря высокой упругости и жесткости теплоизоляция не сползает и не слеживается с течением времени, надолго сохраняя эксплуатационные характеристики.

SIP-технология (Structural Insulated Panels) – это разновидность панельного строительства, поскольку дом собирается из панелей, изготовленных в заводских условиях. С другой стороны, обычно для соединения SIP-панелей используют деревянный брус. В результате внутри SIP формируется жесткий деревянный каркас. Соединительный брус является стойкой, балкой или стропилом. Возможны различные варианты компоновки дома из SIP-панелей.

1. Из SIP-панелей собирают только несущую конструкцию дома. Для внутренних перегородок и для утепления ограждающих конструкций используют другие конструктивные элементы.
2. Из SIP панелей собирается весь дом.
3. SIP-панелями обшивается несущий каркас, а несущая способность SIP панелей не используется. Этот вариант относится к каркасной технологии. Данная схема используется в многоэтажном строительстве за рубежом.

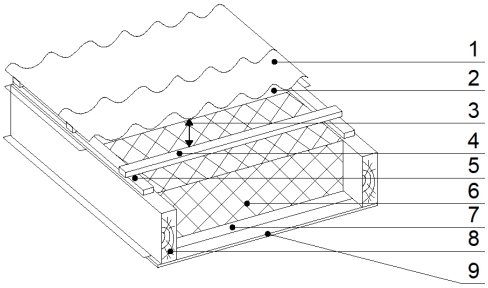


Рис. 3. Конструкция скатной крыши: 1 – кровельный материал; 2 – диффузионная пленка; 3 – воздушный зазор; 4 – обрешетка: доска 30*100 или 25*100 мм; 5 – контррейка; 6 – теплоизоляция – 150 мм; 7 – пароизоляция (диффузионная мембрана); 8 – стропило 50 х 200 мм; 9 – гипсокартонный лист 12,5 мм

Особенностью SIP-технологии является использование OSB-плит ограниченных по высоте размеров, например 1,25*2,5 м (таким образом, высота стены будет ограничена размером 2,5 м). OSB-плиты большего размера (2,8 м; 3,0 м и др.) используются реже, так как такие варианты приводят к увеличению стоимости комплекта деталей дома на 15–20 % и исключают экономические преимущества SIP-технологии. Следующей важной особенностью этапа проектирования является разработка системы вентиляции. Это могут быть вентиляционный фасад и кровля, хорошо вентилируемые камины, вентиляционные штольни, система климат-контроля.

Каркасно-панельное строительство является одним из направлений использования древесины в качестве несущих конструкций здания [2]. Конструкция стеновой панели, производимой на предприятии г. Петрозаводска, состоит из пиломатериалов сечением 42*97/147/197; ветро-влагозащитной паропроницаемой с одной стороны мембраны Изоспан АМ или А; ориентировано-стружечной плиты OSB-3 (ОСП); теплоизоляции ROCKWOOL или Изовер толщиной 100/150/200 мм.

В течение последних 10 лет в Российской Федерации и в Карелии интенсивно используется автоклавный ячеистый бетон различных модификаций.

В малоэтажном строительстве широко применяются газобетонные блоки AEROC, для наружных стен – блоки AEROC Eco Term плотностью D400, класса по прочности на сжатие B2,5. Наружные стены из блоков выполняются двух видов:

1. Со средним теплоизоляционным слоем из минеральной ваты Rockwool и наружным облицовочным слоем из кирпича Терка. При таком конструктивном решении зона конденсации находится в кладке. Для удаления из нее влаги проектируют вентилируемую воздушную прослойку шириной не менее 30–40 мм, а в нижней и верхней части стены и возле оконных проемов – продухи. Продухи получают, устанавливая кирпич на ребро или не заполняя швы в нижней частях облицовочной стены. Соединение облицовочной и несущей стен производят стеклопластиковыми связями или анкерами из нержавеющей стали. В данном случае толщина газобетонного слоя будет больше из-за наличия теплопроводных включений.

2. С наружным теплоизоляционным слоем из минеральной ваты ROCKWOOL и тонкослойной штукатуркой. Специальная штукатурка обладает высокой адгезией к материалу стен, малой усадкой, хорошей гидрофобностью, малым водопоглощением и способностью высыхать после увлажнения. Дома из газобетонных блоков возводятся одно- или двухэтажными.

В многоэтажном строительстве используются ограждающие многослойные конструкции.

Конструкция трехслойной стены из облегченной кладки состоит из продольных наружной и внутренней стенок, соединенных между собой гибкими связями. Наружная верста выполняется из керамического кирпича КО 100/35 ГОСТ 530-2007. Внутренний (несущий) слой выполняется из силикатного кирпича СОР -100/25 ГОСТ 379-95. В качестве утеплителя принят полистиролбетон плотностью D200 по ГОСТ Р 51263-99 толщиной 200 мм. Толщина стен – 570 мм.

Другим вариантом конструкции наружных стен многоэтажных зданий являются вентилируемые фасады. Наличие утеплителя, защищенного от воздействия осадков, и главным образом от воздействия конденсата, значительно снижающего теплосберегающие свойства утеплителя благодаря профильной системе вентилирования фасадов, позволяет в большей степени сократить расходы энергии на отопление. Конструкция вентфасада приведена на рис. 4.

Строительство достаточного количества жилья невозможно без сборного панельного домостроения. Железобетонные стеновые панели в Карелии выпускаются на оборудовании зарубежных производителей.

Предприятие ООО «Бетокон» выпускает наружные стеновые панели двух типов: 1) двухслойные стеновые панели: внутренний несущий слой бетонный, наружный слой – теплоизоляция, готовая для отделки, 2) трехслойные железобетонные стеновые панели.

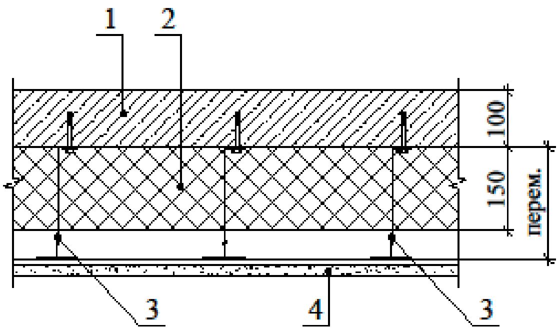


Рис. 4. Схема вентилируемого фасада с облицовкой из натурального камня: 1 – железобетонное основание; 2 – утеплитель ROCKWOOL ВЕНТИ БАТТС; 3 – алюминиевая подсистема навесного фасада MA Vent KH400; 4 – облицовка плитками из натурального камня толщиной 20 мм

Теплоизоляция наружных стеновых панелей – негорючие плиты из стеклянного и каменного волокна. В цокольных стеновых панелях теплоизоляционный слой выполнен из пенополистирола.

На предприятии ООО «Стройиндустрия КСМ» выпускаются наружные трехслойные стеновые панели для зданий с поперечными несущими стенами (конструкция стеновой панели с дверным проемом показана на рис. 5). Толщина панели – 350 мм; толщина наружного слоя – 70 мм; толщина внутреннего слоя – 80 мм для продольных стен и 100 мм для торцевых стен; толщина утеплителя – 200 мм для продольных стен и 180 мм для торцевых стен [5]. Теплоизоляция – пенополистирол, противопожарные разделки из минеральной плиты – ROCKWOOL. Соединение слоев панели с помощью гибких связей.

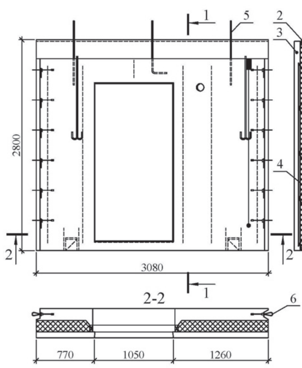


Рис. 5. Конструкция железобетонной стеновой панели: 1 – внутренний слой, бетон тяжелый класса В25; 2 – теплоизоляционные плиты ИЗОФЛОР; 3 – наружный слой: бетон тяжелый класса В25, марки по морозостойкости F75; 4 – гибкая связь из нержавеющей стали; 5 – подъемные петли; 6 – анкеры для соединения панелей в вертикальных стыках

Стыки панелей – плоские вертикальные и горизонтальные, что позволяет сохранить толщину утеплителя одинаковой по всей площади конструкции и повысить теплоизоляционные характеристики здания. Крепление в вертикальных стыках принято по аналогии с финскими проектами – с помощью специальных анкерных выпусков.

Бетонирование панелей производится на оборудовании финской фирмы «ELEMATICOY». Технология производства позволяет получать качественную фасадную поверхность.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каркасное строительство [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://plotnik.me/3795
2. Каркасные дома [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.domkarelia.ru/products/3613
3. СНиП 23-01-99. Строительная климатология / Госстрой России. М., 2000. 57 с.
4. СНиП 23-02-2002. Тепловая защита зданий / Госстрой России. М.: ФГУП ЦПП, 2004. 25 с.
5. Современные энергосберегающие панели [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.kcm- invest.ru/catalog/perspective_home/house_3795/info_5148. html
6. Теплоизоляция дома. Как сберечь тепло? [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.vashdom.ru/articles/rockwool_11. htm

Декабрь, № 8. Т. 2 **Технические науки** **2012**

УДК 378; 001.8

ЕЛЕНА ВАСИЛЬЕВНА ФОТИНА
ведущий программист Регионального центра новых информационных технологий, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
fotina@petrsu.ru

АЛЕКСЕЙ ГЕОРГИЕВИЧ МАРАХТАНОВ
заведующий сектором научно-образовательных Интернет-систем Регионального центра новых информационных технологий, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
marahtanov@petrsu.ru

ОЛЬГА ЮРЬЕВНА НАСАДКИНА
кандидат технических наук, заместитель директора Регионального центра новых информационных технологий, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
onasad@petrsu.ru

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИНДЕКСОВ НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ УЧЕНЫХ ПетрГУ*

Рассматриваются существующие индексы цитирования, основные методы, применяемые в данной области с целью разработки информационно-методической системы для улучшения показателей индексов научного цитирования ученых ПетрГУ.

Ключевые слова: цитирование, индекс цитирования, индекс Хирша, импакт-фактор

Региональный центр новых информационных технологий Петрозаводского государственного университета с начала 2012 года работает над проектом «Научные основы информационно-аналитического обеспечения реализации единой программной и информационной среды управления научно-исследовательской деятельностью вуза». Одной из задач данного проекта является разработка механизмов мониторинга и улучшения показателей индексов научного цитирования сотрудников ПетрГУ. Для решения обозначенной задачи необходимо исследовать предметную область (принципы формирования индексов научного цитирования), определить место ученых ПетрГУ в этих индексах и адекватность имеющихся показателей, а также возможные причины некорректного расчета показателей, по результатам исследования наметить основные возможности и подходы к улучшению существующих показателей и реализовать их на практике.

Исследование предметной области целесообразно начинать с определения цитируемости. Можно говорить о цитируемости ученого, цитируемости статьи и цитируемости журнала.

Статья А цитирует статью Б, если хотя бы один раз в тексте А имеется ссылка на Б и Б, таким образом, вынесена в А в пристатейный список литературы или фигурирует в постраничной сноске. Журнал J цитирует журнал I столько раз, сколько статей из J цитируют статьи из I [3]. По утверждению Е. Гарфилда [9], частота цитирований отражает влияние определенной статьи или определенного ученого и является мерой научно-исследовательской активности или мерой коммуникации на основе этой активности. Эта мера является социометрической. Число цитирований некоторой работы ученого само по себе не является мерой значимости и должно использоваться лишь в совокупности с другими оценками, хотя подсчет цитирований более правомерен, чем подсчет публикаций.

Если говорить о цитируемости ученого, то одним из самых известных показателей является индекс Хирша (h-индекс). Ученый имеет индекс h, если h из его Np статей цитируются как минимум h раз каждая, в то время как оставшиеся (Np – h) статей цитируются не более чем h раз каждая [11].

В свою очередь деятельность научных журналов характеризует импакт-фактор. Его расчет основан на данных трехлетнего периода. Например, импакт-фактор журнала в 2011 году I2011 вычисляется следующим образом: I2011 = A/B, где A – число цитирований статей, опубликованных в данном журнале в 2009–2010 годах, в других журналах, отслеживаемых Институтом научной информации (Institute for Scientific Information, ISI), в течение 2011 года; B – общее число статей, опубликованных в данном журнале в 2009–2010 годах. Импакт-фактор полезен для выявления значимости абсолютного (общего) числа цитирований. Он устраняет некоторую предвзятость в подсчетах, когда крупные журналы оказываются в преимуществе перед небольшими журналами, часто издаваемые – перед редко издаваемыми и старые журналы – перед новыми. В этих случаях у таких журналов большее число цитируемых печатных материалов, чем у журналов менее крупных или более новых. При прочих равных условиях, чем больше ранее опубликованных статей, тем чаще журнал будет цитироваться [15]. Есть разные мнения по поводу использования импакт-фактора и эффективности оценки журналов таким образом. Наиболее лаконичную оценку этому показателю дал Хоэффель. Согласно его утверждению, «импакт-фактор не является совершенным инструментом для измерения качества статей, но нет и ничего лучшего, и его преимущество в том, что он уже существует и, следовательно, представляет собой хороший метод научной оценки. Опыт показал, что в каждой специальности лучшими журналами являются те, в которых труднее всего опубликоваться, и это те журналы, у которых высокий импакт-фактор. И многие из этих журналов появились задолго до того, как импакт-фактор был изобретен» [10]. Импакт-фактор применяется уже в течение долгого времени и является самым известным и широко используемым показателем для журналов. В то же время несколько лет назад появился SCImago journal rank (SJR) indicator, который часто сравнивают с импакт-фактором [6]. В качестве источника берутся данные индекса цитирования Scopus. Оба показателя подсчитываются делением числа цитирований в некотором журнале на общее число статей в этом журнале за определенный период. Но SJR индикатор зависит от «престижа» журнала и не учитывает самоцитирования. Для оценки качества научных журналов SJR индикатор применяет PageRank алгоритм, используемый поисковой системой Google для оценки веб-страниц. Также необходимо отметить и тот факт, что, в отличие от импакт-факторов, доступных по подписке, данные SJR индикатора находятся в открытом доступе.

В настоящее время использование показателей цитирования становится все более востребованным, поскольку они являются показателями результативности деятельности вуза, а также представляют индикаторы качества для исследователей, научных организаций и научных периодических изданий. Необходимо отметить, что показатели цитирования зависят от разных факторов, в том числе и от области знаний. В частности, показатели биологов и медиков выше, чем у физиков, а у физиков выше, чем у математиков. Это связано в первую очередь с общим числом ученых в области медицины, физики или математики в целом. С другой стороны, сравнивая таким образом исследователей, следует учитывать и тот факт, что при подсчете показателей учитываются по большей части только журнальные статьи и некоторые публикации конференций [1]. Что касается непосредственно индекса Хирша, то необходимо добавить, что, конечно же, не все статьи ученого способствуют увеличению данного индекса. Ряд статей с низким числом цитирований никогда не будут учтены при подсчете индекса Хирша. Большинство статей получают наибольшее число цитирований в определенный период времени и затем больше не цитируются. Иными словами, те статьи, которые увеличивали h-индекс ученого в ранний период его карьеры, в более поздний период карьеры учитываться в h-индексе не будут. Но несомненно, индекс Хирша уменьшаться со временем не может [9]. Эти и другие особенности, свидетельствующие о некой доле относительности различных показателей, следует учитывать, формируя выводы, основанные на их значениях. Показатели цитирования дают возможность в некоторой степени сопоставить уровень научных исследований разных организаций или отдельных исследователей. Поэтому их значения, в частности, оказывают влияние на позиции вуза в различных рейтингах. Например, в Национальном рейтинге университетов (http://unirating.ru/) учитываются в том числе и наукометрические данные, такие как общее число публикаций, суммарное число цитирований публикаций организации, индекс Хирша в базах данных цитирования Web of Science, Scopus и РИНЦ.

Значения показателей часто учитываются при определении победителей грантов, конкурсов, программ. Например, при подаче заявки в Российский гуманитарный научного фонд, в частности, нужно указать количество публикаций в изданиях, входящих в системы индексов цитирования «Social Sciences Citation Index» (SSCI), «Arts and Humanities Citation Index» (AHCI) и Российский индекс цитирования (РИНЦ) (http://www.rfh.ru/downloads/IS_RFH.pdf).

Другим важным объектом рассматриваемой области является индекс цитирования. Индекс цитирования – это библиографическая база данных, указатель ссылок между публикациями, позволяющая определить статьи, цитируемые данной публикацией и цитирующие ее. Первый индекс цитирования для статей, опубликованных в научных журналах, был предложен Е. Гарфилдом в 1955 году в статье «Citation Indexes for Science: A New Dimension in Documentation through Association of Ideas» [7]. Гарфилд в этой статье говорит о новом подходе в научной литературе, когда индекс цитирования сводит вместе тот материал, который никогда бы не был сопоставлен обычным предметным индексированием. Он описывает индекс цитирования как индекс соединения идей. Благодаря индексу цитирования автор может без труда определить, какие из ученых ссылались на его работу, что, в свою очередь, способствует большей коммуникации между учеными. Возможно, ученый даже узнает о влиянии, которое оказала его работа и о котором он даже не догадывался. Таким образом, полезность индекса цитирования можно рассматривать с точки зрения передачи идей.

Цитирование предполагает взаимосвязь между частью или всеми цитируемыми статьями с частью или всеми цитирующими статьями. Проследив за последующими цитированиями, можно увидеть историю развития некоторой идеи: где и как она применялась, была ли подтверждена, отклонена или вовлечена в дальнейшую работу. Связь идей обеспечивается ссылками, которые делает автор, на более ранние статьи. Но таким образом устанавливаются лишь ссылки в прошлое. Благодаря индексам цитирования ссылки реорганизуются, обеспечивая дополнительную возможность проследить развитие этих же тем, но уже по времени вперед [12].

Индекс цитирования выполняет две фундаментальные функции [8]. Во-первых, он дает информацию о том, что было опубликовано. Во-вторых, он показывает, как каждый кирпич в здании науки связан со всеми остальными.

В базах данных цитирования хранится полная библиографическая информация о статье, аннотация (если есть) и список цитируемой литературы, а также информация об авторах и местах их работы. Самыми известными международно признанными индексами цитирования являются Web of Science и Scopus.

Web of Science предоставляется компанией Thomson Reuters. На данный момент предлагается поиск среди свыше 12 000 журналов и 148 000 материалов конференций, 50 миллионов записей и 800 миллионов цитирований, охватывая период цитирования начиная с 1900 года. Web of Science включает в себя следующие базы данных: Science Citation Index Expanded, Social Sciences Citation Index, Arts & Humanities Citation Index, Index Chemicus, Current Chemical Reactions и Book Citation Index. Все заголовки журналов, включенных в научные продукты Thompson Reuters, доступны через Master journal list (http://ip-science.thomsonreuters.com/mjl). Можно просматривать полный список журналов, а также осуществлять поиск по базе данных, ключевым словам, заголовку журнала или его ISSN. С помощью этого списка можно выбрать значимый журнал для публикации научной статьи или журнал, который представляет наибольший интерес научной общественности в конкретной области знаний. В Thomson Reuters добавление и исключение журналов осуществляется постоянно в течение года. Ежегодно рассматриваются свыше 2000 журналов, и 10–12 % из них включаются в базу. Более того, текущий список журналов, представленных в продуктах Thomson Reuters, постоянно пересматривается. При оценке журналов оцениваются разные факторы: базовые издательские стандарты журналов, их содержание, международный состав авторов и данные по цитированию [2].

Реферативная база данных SciVerse Scopus индексирует более 18 000 наименований научно-технических и медицинских журналов примерно 5 000 международных издательств. Предоставляется компанией Elsevier. База данных Scopus обновляется ежедневно. В Scopus включены журналы из всех географических регионов, в том числе и не англоязычные (но могут идти с аннотацией на английском языке). В общей сложности примерно 21 % журналов в Scopus опубликованы на других языках, кроме английского (или опубликованы и на английском, и на каком-то другом языке). Более чем половина содержимого представлена другими странами Европы, Латинской Америки и Азиатско-Тихоокеанского региона [14].

Необходимо отметить, что вышеуказанные индексы цитирования, Web of Science и Scopus, доступны только по подписке.

Существуют индексы цитирования с бесплатным доступом. Автоматический индекс цитирования Google Scholar (Google Академия) обеспечивает возможность поиска научной литературы в глобальной сети. Таким образом, он охватывает все науки и дисциплины, языки и страны, а также все типы источников публикаций. Google Scholar позволяет выполнять поиск среди прошедших рецензирование научных журналов, статей, тезисов, диссертаций, книг, препринтов, презентаций и технических отчетов, предоставляемых университетами, научными институтами, профессиональными сообществами, исследовательскими группами. Подчас Google Scholar позволяет найти цитирования в журналах и материалах конференций, не включенных в другие индексы цитирования. Одним из важнейших свойств Google Scholar является возможность ученому проследить цитирования вперед по времени: с каждой статьей предоставляется список тех более поздних статей, которые цитируют данную. При поиске наиболее цитируемые статьи будут расположены раньше. Из неудобств использования Google Scholar можно отметить некоторые неточности с подсчетом цитирований, проблемы с идентификацией однофамильцев: ученые, имеющие одинаковые инициалы, не будут различаться в системе, и в данной базе цитирования отсутствует классификация по предметным областям [13].

В 2005 году появился Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Он включает в себя более 2 миллионов публикаций российских авторов, а также информацию о цитировании этих публикаций из более 3000 российских журналов. Основная задача, которая стоит перед РИНЦ, это создание максимально полной базы данных научных публикаций российских ученых. Благодаря отечественному индексу цитирования намного облегчилась задача поиска публикаций российских авторов и поиска информации о самих ученых. Помимо собственно публикаций с их библиографической и цитатной информацией, РИНЦ предоставляет аналитическую информацию об авторах. По каждому автору в базе данных РИНЦ приводится анализ публикационной активности, включающий в себя различные показатели по числу цитирований и числу публикаций, а также статистические отчеты по распределению публикаций и цитирований. Доступ и регистрация в РИНЦ бесплатны. Авторы, зарегистрировавшиеся в системе Science Index, являющейся аналитической надстройкой над РИНЦ, получают доступ к целому ряду различных инструментов и сервисов. В частности, для зарегистрированных пользователей на странице с библиографическим описанием публикации показывается, помимо числа цитирований в РИНЦ, и число цитирований данной публикации в Web of Science и Scopus. Также, что особенно важно, зарегистрированные пользователи могут работать со списком своих публикаций, добавляя в него ссылки, которые система не смогла приписать ему автоматически, или, наоборот, удалить те ссылки, которые были приписаны по ошибке. Причины некоторых неточностей в списках публикаций могут быть следующие. Во-первых, в базе данных системы встречаются однофамильцы, причем одинаковыми бывают и инициалы авторов. Во-вторых, довольно часто встречаются ошибки в фамилиях или инициалах авторов. Также подчас автор вообще не включен в список авторов публикации, так как некоторые журналы ограничивают число авторов в списке цитируемой литературы [4], [5].

Ученые Петрозаводского государственного университета представлены в каждом из вышеперечисленных индексов цитирования.

Необходимо отметить некоторые проблемы с неоднозначностью представления данных, особенно в зарубежных индексах цитирования. В частности, название Петрозаводского университета в Web of Science записано в четырех вариантах: «petrozavodsk state univ», «univ petrozavodsk», «petrozavodsk univ» и «petrozavosk state univ». Разные способы написания встречаются и у авторов, что вызвано рядом причин, самой распространенной из которых является сложность транслитерации, например «petrovskiy» и «petrovsky». Помимо этого могут быть указаны полные или неполные инициалы: «petrov v» и «petrov ve». Кроме того, ошибки могут возникать после распознавания текста: «pergarnent al» и «pergaunent al» для автора «pergament al».

Аналогичным образом в Google Академии результаты поиска публикаций ПетрГУ с указанием названия университета на русском или английском языках будут отличаться. Также и для подсчета числа цитирований, индекса Хирша и числа публикаций Google Академия показывает разные цифры в зависимости от формы записи имени автора: на русском языке или транслитерацией.

Из вышесказанного следует, что для успешного продвижения авторов научных публикаций, повышения их личных показателей цитирования необходимо соблюдение целого ряда условий. Ключевым фактором является написание ученым интересных статей, которые будут публиковать и цитировать. Но помимо этого ему необходимо предпринять ряд шагов, которые будут этому способствовать. Как минимум ученый должен знать об имеющихся показателях, на основе которых проводится оценка его научной деятельности, о существующих в настоящее время базах данных цитирования и тех возможностях, которые ему предоставляются после регистрации, персонализации в этих системах. Кроме этого, опираясь на предоставляемые индексами цитирования списки высокоимпактных журналов, ученый будет знать, в каких журналах ему лучше печататься.

Результаты исследования показывают, что частой причиной некорректных данных в индексах научного цитирования о цитируемости статей сотрудников ПетрГУ является несоблюдение авторами формальных принципов подготовки статей к публикации, их оформления, а также выбора соответствующих изданий для размещения статей. Для решения обозначенной проблемы необходима реализация информационно-методической поддержки ученых ПетрГУ – авторов статей, которая должна заключаться в предоставлении своевременной и актуальной информации о существующих индексах научного цитирования, принципах их формирования, об индексируемых научных изданиях, а также о текущем месте в индексах и фактических значениях показателей самого автора статьи.

Одним из способов осуществления информационно-методической поддержки может стать предоставление каждому ученому ПетрГУ доступа к информационной системе, содержащей обозначенные выше сведения. В связи с этим было принято решение о создании информационно-аналитической системы «Показатели цитирования ученых ПетрГУ». Информационная система должна включать в себя следующие основные разделы:

- «Об индексах цитирования»;
- «Инструкции, рекомендации»;
- «Вспомогательные сервисы»;
- «Онлайн-консультант»;
- «ПетрГУ в индексах цитирования» и пр.

В разделе «Об индексах цитирования» будет доступна базовая информация о самых известных индексах цитирования, таких как Web of Science, РИНЦ, Google Академия и Scopus. В модуле «Инструкции, рекомендации» пользователям системы будут, в первую очередь, предложены инструкции по регистрации, созданию своего профиля в основных индексах цитирования. Как уже отмечалось, это дает целый ряд возможностей для авторов, наиважнейшая среди которых – работа со своим списком публикаций. Кроме этого, создание профиля помогает расширить круг ученых, с которыми автор сотрудничает. Пользователь сможет изучить подробные текстовые инструкции или же посмотреть видеоинструкции, в которых по шагам рассказывается процедура регистрации. Также в этом модуле будут рекомендации по выбору журналов и подготовке научных статей. Наряду с текстовыми рекомендациями будут представлены списки высокоимпактных журналов по оценке таких индексов цитирования, как Web of Science и РИНЦ. В разделе «Онлайн-консультант» пользователям будет доступна форма обратной связи, позволяющая задать любые вопросы по теме индексов цитирования экспертам, например специалистам отдела научных исследований вуза. Среди сервисов раздела «Вспомогательные сервисы» необходимо выделить предлагаемую пользователям стандартную транслитерацию. Как уже отмечалось, одной из проблем в международных индексах цитирования является неоднозначность записи имен ученых, как результат – могут возникать неточности в привязке публикаций к автору и поэтому производиться неправильные подсчеты показателей. В дальнейшем планируется добавление модуля «ПетрГУ в индексах цитирования», отображающего данные по показателям ученых университета в разных индексах цитирования, а также включающего в себя диаграмму роста показателей ПетрГУ.

Запуск информационной системы в эксплуатацию запланирован на 2013 год. В настоящее время разработан прототип системы, который тестируется группой экспертов.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнольд Д., Фаулер К., Шаракшанэ С. Индекс цитирования – инструмент, а не цель! [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nanometer.ru/2011/04/27/nauchnie_publikacii_258790.html
2. Джеймс Теста. Процесс отбора журналов в Thomson Reuters [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://thomsonreuters.com/content/science/pdf/ssr/journal_selection_essay-russian.pdf
3. Писляков В. В. Наукометрические методы и практики, рекомендуемые к применению в работе с российским индексом научного цитирования // Отчет о научно-исследовательской работе (промежуточный) по теме «Разработка системы статистического анализа российской науки на основе данных российского индекса цитирования». М., 2005.
4. Российский индекс научного цитирования [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://elibrary.ru/project_risc.asp
5. Российский индекс научного цитирования: успехи и проблемы. Проект глазами его разработчиков [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.polit.ru/article/2009/01/26/rints/
6. Falagas M. E., Kouranos V. D., Arencibia-Jorge R., Karageorgopoulos D. E. Comparison of SCImago journal rank indicator with journal impact factor // The Faseb Journal. 2008. Vol. 22. P. 2623–2628.
7. Garfield E. Citation Indexes for Science: A New Dimension in Documentation through Association of Ideas // Science. 1955. Vol. 122, №. 3159. P. 108–111.
8. Garfield E. Citation Indexing for Studying Science // Essays of an Information Scientist. 1970. Vol. 1. P. 132.
9. Garfield E. Citation Frequency as a Measure of Research Activity and Performance // Essays of an Information Scientist. 1973. Vol. 1. P. 406–408.
10. Garfield E. The Evolution of the Science Citation Index Search Engine to the Web of Science, Scientometric Evaluation and Historiography, 2007 [Electronic resource]. Access mode: http://garfield.library.upenn.edu/papers/barcelona2007.pdf
11. Hirsch J. E. An index to quantify an individual's scientific research output // Proc. Nat. Acad. Sci. 2005. Vol. 102. № 46. P. 16569–16572.
12. Malin M. V. The Science Citation Index, a new concept in indexing // Library Trends. 1968. Vol. 16. № 3. P. 374–387.
13. Noruzi A. Google Scholar: The New Generation of Citation Indexes // Libri. 2005. Vol. 55. P. 170–180.
14. SciVerse Scopus Content Coverage Guide [Electronic resource]. Access mode: http://www.info.sciverse.com/UserFiles/sciverse_scopus_content_coverage_0.pdf
15. The Thomson Reuters Impact Factor [Electronic resource]. Access mode: http://thomsonreuters.com/products_services/science/free/essays/impact_factor/

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Декабрь, № 8. Т. 2 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 533.9

ВЛАДИМИР СТАНИСЛАВОВИЧ ИГНАХИН
кандидат физико-математических наук, преподаватель кафедры электроники и электротехники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
art101@mail.ru

ВАЛЕРИЙ ИВАНОВИЧ СЫСУН
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электротехники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vsysun@psu.karelia.ru

АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ ТИХОМИРОВ
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий и энергосбережения физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
sasha.82@mail.ru

ЗОНДОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЕ*

В работе были получены экспериментальные данные по ионному току на зонд в условиях разряженной плазмы. Было проведено сравнение экспериментальных результатов с результатами теоретического моделирования. Анализ данных показывает, что во всех случаях результат эксперимента близок к приближению радиального дрейфа и влияние тепловой скорости ионов на величину зондового тока отсутствует.

Ключевые слова: плазма, электрические зонды, диагностика

Одной из основных задач зондовой диагностики плазмы является определение концентрации плазмы, что достигается измерениями либо электронного, либо ионного тока насыщения [2]. При этом, для того чтобы измерительный зонд не влиял существенным образом на параметры исследуемого плазменного объекта, потери заряженных частиц на зонде должны быть существенно меньше суммарных потерь в плазме вследствие рекомбинации. Поэтому часто концентрация плазмы определяется по ионной ветви зондовой характеристики. Недостатком этого подхода является сложность теоретической интерпретации измеренного ионного тока.

В настоящее время для теоретической интерпретации ионной части зондовой характеристики используются различные теоретические интерпретации, применимость каждой из которых зависит от конкретных параметров плазмы (давление, температура компонент и т. п.). Так, в области низкого давления это орбитальная и радиальная теории [14], [15]. Орбитальная теория применима в том случае, когда ионы обладают значительным моментом количества движения (ионная температура отлична от нуля) и выполняется приближение бесстолкновительного движения, при этом учитываются все орбиты ионов в поле зонда. В этом случае даже редкие столкновения ионов с нейтралами разрушают орбитальное движение частиц и могут существенным образом влиять на сбор тока зондом, что показано численными расчетами методами молекулярной динамики [3]. В случаях, когда модель орбит неприменима, более корректной является теория радиального дрейфа, предполагающая чисто радиальное движение ионов на зонд. Упрощением радиальной теории является теория слоя, когда поверхность слоя пространственного заряда рассчитывается по закону «3/2», считая что весь потенциал сосредоточен в слое, а плотность тока на слой рассчитывается по скорости $\sqrt{\frac{kT_e}{M}}$ (где k – постоянная Больцмана, T_e – температура электронов, M – масса иона). Теория слоя дает большую ошибку при малых размерах зондов, когда отличие геометрии от плоской существенно [9]. Отметим, что как радиальная, так и орбитальная теории не учитывают ионизацию в объеме и предполагают формирование тока на бесконечности.

Теория ионного тока на электрический зонд при промежуточных давлениях без учета ионизации рассматривалась в [4], [15]. Расчеты для плотной плазмы [10] показали существенное влияние ионизации на величину ионного тока насыщения. Ввиду этого актуальным является исследование влияния ионизации на формирование ионного тока на зонд при низких и промежуточных давлениях. Учет ионизации при низких и промежуточных давлениях проводился в [8], [10]. В [8] рассматривается аналитическая модель в приближении радиального дрейфа с учетом ионизации и столкновений с атомами, в [7] дополнительно учтены влияние температуры ионов через орбитальный момент на величину зондового ионного тока. Однако сравнения результатов этих работ с экспериментом не выполнялось.

В данной работе приводятся результаты некоторых экспериментов по измерению ионного тока на сферические и цилиндрические зонды в широком диапазоне размеров зондов и сравнение с моделями [1], [8].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для сравнения теоретических результатов с экспериментом требуется иметь хорошо изученный плазменный объект, параметры плазмы которого известным образом определяются макропараметрами разряда (родом газа наполнения, его давлением, разрядным током, размером камеры). Другой возможный подход состоит в измерении параметров плазмы (в первую очередь концентрации) независимым способом. В данной работе был выбран первый путь – зондовые измерения проводились в разреженной плазме положительного столба цилиндрической трубки. Параметры плазмы положительного столба могут быть найдены по параметрам разряда (давление, ток, размер трубки и т. д.) по известным теориям [1].

Разрядная камера, в которой зажигался тлеющий разряд, имеет форму трубки (использовались две трубки – внутренние радиусы 1,0 и 1,5 см). В трубке имеются два стеклянных отростка, изготовленных на основе вакуумных кранов, предназначенных для размещения в них зондов. Такая конструкция позволяет производить замену зондов. Расстояние между зондами составляет 12 см.

Для осуществления разряда в трубке меньшего диаметра разрядная камера была дополнена внутренней вставкой 1 (рис. 1). Диаметр внутренней трубки в эксперименте составлял 8 мм.

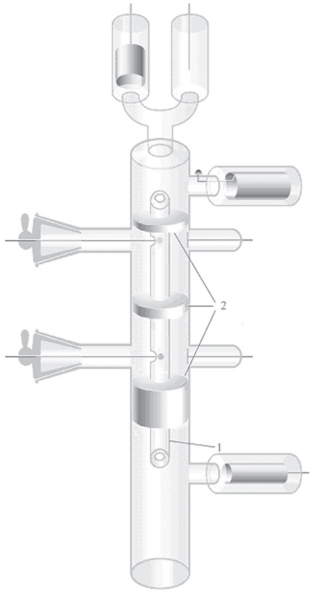


Рис. 1. Общий вид разрядной камеры с внутренней вставкой: 1 – внутренняя трубка диаметром 8 мм; 2 – перегородки

Зонды изготавливались из вольфрамовой и молибденовой проволоки. Были изготовлены сферические зонды различного диаметра (300 мкм, 500 мкм, 2,5 мм), а также цилиндрические зонды диаметрами 25 и 75 мкм. Цилиндрические зонды изготавливались методом электрохимического травления, сферические – оплавлением в электрической дуге. Для исключения подвода из эффективной площади поверхности зонда подвод в дальнейшем изолировался при помощи капилляра из молибденового стекла. Зонды посредством системы магнитного перемещения могли позиционироваться вдоль радиуса разрядной трубки.

Для откачки разрядной камеры использовался вакуумный пост Leybold PT 70 Dry, состоящий из безмасляного спирального форвакуумного насоса и турбомолекулярного насоса. Разрядная камера откачивалась до остаточного давления не выше $2 \cdot 10^{-5}$ торр. Напуск рабочего газа в камеру осуществлялся посредством натекателя. Контроль напущенного газа производился с помощью баротрона (диапазон измеряемого давления 0,05–10 мм рт. ст.). Зондовые измерения проводились по однозондовой методике. Осевое поле в разряде оценивалось по двухзондовой методике [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 представлена типичная вольт-амперная характеристика зондов, полученных в эксперименте.

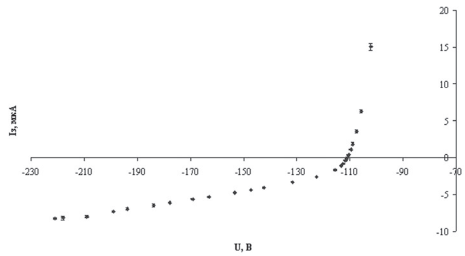


Рис. 2. Зондовая характеристика. Радиус трубки Rтр = 0,4 см; аргон 0,08 торр; ток разряда Iр = 1,5 мА; сферический зонд $r_з$ = 0,15 мм

Электронная температура T_e определялась методом первой производной зондового тока в точке плавающего потенциала, считая, что она существенно превышает производную ионного тока [7]:

$$\frac{kT_e}{e} = I_i \left(\frac{dI_e}{dU} \right)^{-1} = \frac{I_i}{\dfrac{dI_з}{dU} + \dfrac{dI_i}{dU}} \approx \frac{I_i}{\dfrac{dI_з}{dU}}. \qquad (1)$$

Здесь I_i – ионный ток в точке плавающего потенциала, $I_з$ – зондовый ток.

Потенциал плазмы определялся по плавающему потенциалу:

$$U_п = U_0 + \Delta U_0, \quad \frac{e\Delta U_0}{kT_e} \approx \ln\left(0{,}67 \sqrt{\frac{M}{m}} \right), \qquad (2)$$

где m – масса электрона.

Ионный ток определялся по известному потенциалу плазмы путем вычитания электронного тока:

$$I_e = \frac{en_0 S_з}{4}\sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m}}\exp\left(-\frac{|eU_з|}{kT_e}\right), \qquad (3)$$

где $S_з$ – площадь зонда.

СРАВНЕНИЕ С ТЕОРИЕЙ

Теория плазмы положительного столба в диффузионном режиме ($\lambda_i, \lambda_e < R_{тр}$), развитая Шоттки [1], позволяет определить параметры плазмы (концентрацию, частоту ионизации) по известным разрядным условиям (род газа, давление, ток).

Плотность разрядного тока связана с концентрацией электронов следующим соотношением:

$$j = e\mu_e nE, \qquad (4)$$

где μ_e – подвижность электронов, n – концентрация электронов ($n = n_e \approx n_p$), E – напряженность поля. Ток разряда, учитывая бесселевский профиль концентрации, таким образом,

$$I = e\mu_e E\int_0^{R_{тр}} 2\pi r n_0 J_0(2.4\frac{r}{R_{тр}})dr \approx 0.423 e\mu_e n_0 E\pi R_{тр}^2, \qquad (5)$$

где n_0 – концентрация электронов на оси. Из последнего соотношения можно получить концентрацию плазмы при известном токе разряда. Величина поля E находилась в эксперименте. В неоне $\mu_e p = 1{,}5 \cdot 10^6 см^2 \cdot торр/(В \cdot с)$, в аргоне – $\mu_e p = 3{,}3 \cdot 10^5 см^2 \cdot торр/(В \cdot с)$ [6].

В пренебрежение объемной рекомбинацией частота ионизации находится из соотношения:

$$z = D_a/\Lambda^2 \equiv \nu_{da},\ \Lambda = R_{тр} / 2{,}4. \qquad (6)$$

Коэффициент амбиполярной диффузии D_a находится по соотношению:

$$D_a = \mu_p \frac{kT_e}{e}, \qquad (7)$$

где μ_e – подвижность ионов. Подвижность ионов неона $\mu_p p = 4{,}2 см^2 \cdot атм/(В \cdot с)$, аргона $\mu_p p = 1{,}53 см^2 \cdot атм/(В \cdot с)$.

Длина свободного пробега ионов, предполагая, что доминирующим механизмом рассеяния является резонансная перезарядка, определялась по соотношению:

$$\lambda_i = \frac{1}{n\sigma_n}. \qquad (8)$$

Величины сечений σ_n для неона $\sigma_n = 3{,}83 \cdot 10^{-15} см^2$, для аргона $\sigma_n = 7{,}19 \cdot 10^{-15} см^2$ [12].

По известным значениям T_e, n_0, z, λ_i таким образом можно получить безразмерные параметры $U = \frac{e\varphi}{kT_e}$, $a = \frac{r_з}{\lambda_д} = \frac{r_з e}{\sqrt{\varepsilon_0 kT_e / n_0}}$, $A = \frac{z\lambda_д}{\sqrt{kT_e / M}} = \frac{z}{\omega_i}$, $l_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_д}$, $j' = \frac{j}{en_0\sqrt{kT_e / M}}$ ($\lambda_д$ – электронный дебаевский радиус) для сравнения с результатами теории [8], [10]. Некоторые результаты сравнения расчетных и экспериментальных ВАХ приведены на рис. 3–4.

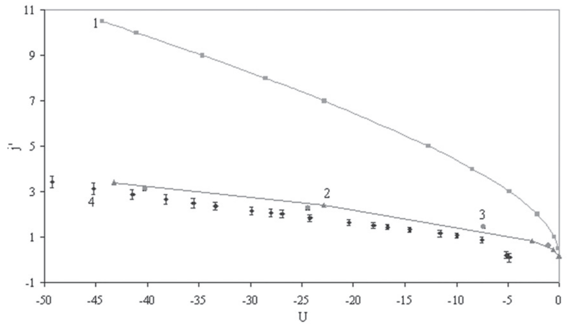


Рис. 3. Сравнение результатов эксперимента с теоретическими расчетами (неон, 0,5 торр, ток разряда 1,0 мА, радиус трубки 1 см, радиус сферического зонда 1,25 мм. 1 – радиальная теория [16], 2 – приближение радиального дрейфа с учетом ионизации и столкновений [9], 3 – учет ионизации, столкновений и температуры ионов по [7], 4 – эксперимент. $a = 2{,}9$, $l_i = 0{,}5$, A = 0,028

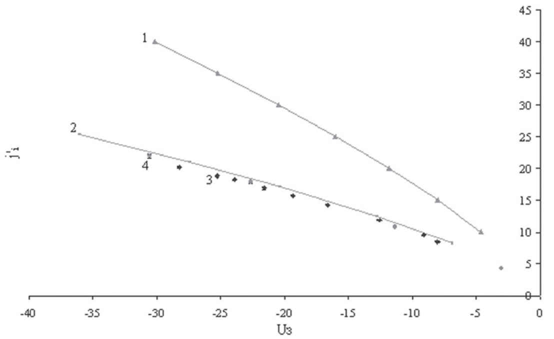


Рис. 4. Сравнение результатов эксперимента с теоретическими расчетами (аргон, 0,15 торр, ток разряда 1,0 мА, радиус трубки 0,4 см, радиус сферического зонда 0,15 мм. 1 – радиальная теория [16]; 2 – приближение радиального дрейфа с учетом ионизации и столкновений [9]; 3 – эксперимент $a = 0{,}59$, $l_i = 1{,}1$, A = 0,075, 4 – учет температуры по [7]

Во всех экспериментально исследованных случаях величина $l_i \lesssim 1$, вследствие чего для данных размеров зондов влияние орбитального движения пренебрежимо мало.

Результаты всех измерений для потенциала U = 20 приведены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное сравнение указывает на хорошее соответствие модели радиального дрейфа с учетом ионизации и столкновений результатам эксперимента. Значение параметра $l_i \sim 1$ и влияние ионной температуры на величину ионного тока в таких условиях пренебрежимо мало даже при размерах зондах $a \sim 0{,}01$ (минимальный размер в проведенных экспериментах). В то же время радиальная теория без учета ионизации и столкновений дает завышенный результат, что также связано с влиянием столкновений.

Из проведенных измерений видно, что во всех случаях результат эксперимента близок к приближению радиального дрейфа и влияние тепловой скорости ионов на величину зондового тока отсутствует. В условиях экспериментов [16] величина l_i была существенно выше (~ 50).

Сравнение результатов измерений с расчетами, U_a = -20

Зонд	Газ	Давление, торр	$R_{тр}$, см	$I_{разр}$, мА	T_e, эВ	a	l_i	A	j' (эксперимент)	j' ([16])	$j'(T_i$, учет ионизации и столкновений) [9]
Сфер. Rз = 0,15 мм	Ar	0,08	0,4	1,5	3,5	0,52	1,86	0,184	17,7 ± 0,3	33,7	23
Цил. Rз = 37,5 мкм	Ar	0,08	0,4	1,5	3,5	1,3	1,86	0,184	15,6 ± 0,3	27,7	18,3
Цил. Rз = 12,5 мкм	Ar	0,08	0,4	1,5	3,5	0,43	1,86	0,184	42,0 ± 0,5	70,6	47,2
Сфер. Rз = 0,15 мм	Ar	0,15	0,4	1	2,7	0,59	1,14	0,075	16,1 ± 0,2	29,4	16,8
Цил. Rз = 37,5 мкм	Ar	0,15	0,4	1	2,7	0,15	1,14	0,075	15,0 ± 0,5	24,5	12,7
Цил. Rз = 12,5 мкм	Ar	0,15	0,4	1	2,7	0,05	1,14	0,075	44,0 ± 0,5	61,6	32,9
Сфер. Rз = 0,15 мм	Ar	0,25	0,4	1	2,8	0,74	0,86	0,037	10,4 ± 0,1	23,5	11,6
Цил. Rз = 37,5 мкм	Ar	0,25	0,4	1	2,8	0,185	0,86	0,037	10,1 ± 0,2	20,8	8,9
Цил. Rз = 12,5 мкм	Ar	0,25	0,4	1	2,8	0,062	0,86	0,037	30,0 ± 0,5	51,2	22,5
Сфер. Rз = 1,25 мм	Ne	0,5	1	1,0	3,7	2,9	0,5	0,028	1,6 ± 0,2	6,4	2,2
Сфер. Rз = 0,25 мм	Ne	0,5	1	1,0	3,7	0,58	0,5	0,028	11,0 ± 0,9	29,6	11,7
Сфер. Rз = 1,25 мм	Ne	0,23	1	1,0	5,6	1,8	0,7	0,057	3,3 ± 0,3	29,8	4,3
Сфер. Rз = 0,25 мм	Ne	0,23	1	1,0	5,6	0,37	0,7	0,057	24,0 ± 1,7	58,1	24,3
Сфер. Rз = 1,25 мм	Ar	0,08	1,5	1,5	2	2,9	1,25	0,015	3,0 ± 0,3	6,2	3,2
Сфер. Rз = 0,15 мм	Ar	0,08	1,5	1,5	2	0,35	1,25	0,015	30,0 ± 0,8	51	31
Цил. Rз = 37,5 мкм	Ar	0,08	1,5	1,5	2	0,35	1,25	0,015	20,0 ± 0,3	39	18
Цил. Rз= 12,5 мкм	Ar	0,08	1,5	1,5	2	0,03	1,25	0,015	51,0 ± 1,3	99	45
Сфер. Rз = 1,25 мм	Ar	0,15	1,5	1,0	2	2,6	0,6	0,009	2,9 ± 0,05	7,2	2,5

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012–2016 годы, Минобрнауки РФ, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013)», государственные контракты № 14.740.11.0895, № 14.740.11.0137, № 16.740.11.0562, № 14.740.11.1157, № 14. B37.21.0755, № 14.B37.21.0747, № 14.B37.21.1066, а также в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России и заказом Департамента научных и научно-педагогических кадров университету на оказание услуг № 2.3282.2011 и № 2.2774.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 544 с.
2. Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. М.: Мир, 1967. 546 с.
3. Зобнин А. В., Нефедов А. П., Синельщиков В. А., Фортов В. Е. О заряде пылевых частиц в газоразрядной плазме низкого давления // ЖЭТФ. 2000. Т. 118. С. 554.
4. Мойжес В. Я., Немчинский В. А. Ионный ток насыщения на зонд при больших и промежуточных давлениях // ЖТФ. 1970. Т. 40. С. 419.
5. Немчинский В. А. Расчет ионного тока на зонд при промежуточных давлениях в пределе холодных ионов // ЖТФ. 1970. Т. 40. Вып. 2. С. 416.
6. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Интеллект, 2009. 736 с.
7. Сысун В. И. Зондовые методы диагностики плазмы. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1997. 60 с.
8. Сысун В. И., Игнахин В. С. Радиальная теория ионного тока на зонд в плазме низкого давления с учетом объемной ионизации и столкновений с атомами // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 4. С. 377–386.
9. Сысун В. И., Игнахин В. С. Уточнение закона трех вторых и радиальной теории ионного тока на малый зонд или пылевую частицу в разряженной плазме // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 7. С. 60–65.
10. Сысун В. И., Тихомиров А. А., Тихонов Е. А., Игнахин В. С. Моделирование ионного тока на зонд с учетом ионизации и столкновений в плазме низкого давления методом крупных частиц // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 8. С. 51–55.
11. Ульянов К. Н. Теория зондов в плотной плазме // ЖТФ. 1970. Т. 40. С. 790.
12. Физические величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
13. Allen J. E., Boyd R. L. F., Reynolds P. The collection of positive ions by a probe immersed in a plasma // Proc. Phys. Soc. 1957. Vol. B70. № 6. P. 297–304.
14. Allen J. E., Turrin A. The collection of positive ions by a probe immersed in a plasma // Proc. Phys. Soc. 1964. Vol. 83. P. 177–179.
15. Bohm D. Minimum ionic kinetic energy for a stable sheath // The characteristics of electrical discharges in magnetic fields / Ed. A. Guthric, R. K. Wakerling. N. Y.: Mc. Graw-Hill, 1949.
16. Sternovsky Z., Robertson S., Lampe M. The contribution of charge exchange ions to cylindrical Langmuir probe current // Phys. Plasmas. 2003. Vol. 10. № 1. P. 300–309.

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Декабрь, № 8. Т. 2 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 535.353; 539.186

АНТОН ЮРЬЕВИЧ КОГОЧЕВ
старший преподаватель кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
AntKg@yandex.ru

СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ КУРСКОВ
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kurskov@psu.karelia.ru

ВАЛЕРИЙ ИВАНОВИЧ СЫСУН
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
sysun@psu.karelia.ru

EXCITATION PROCESSES IN Ar-Ar COLLISIONS*

The present work is devoted to study of Ar($3p^5$ 4p) states excitation in binary low-energy Ar-Ar collisions. The results of the experimental investigation of excitation cross sections of Ar I $4p[3/2]_2$, $4p'[3/2]_1$, $4p'[1/2]_1$ and $4p'[3/2]_2$ levels in the collision energy range from threshold up to 500 eV (centre of mass system) and degree of polarization for $4s[3/2]_2^0 - 4p[3/2]_2$ and $4s[3/2]_2^0 - 4p'[1/2]_1$ transitions in this energy range are represented.

Key words: Atomic collisions, excitation cross sections, quasimolecule, polarization of emission, mechanism of excitation

INTRODUCTION

The importance of investigating non-elastic collisions of argon atoms is conditioned by their significant role in different scientific and technical applications. The determining of quantitative scattering characteristics in the conditions of a beam experiment plays a considerable role among the numerous research aspects of non-elastic collision of neutral particles. The low collision energy range is of special interest since theoretical treatment of non-elastic processes at such energies is rather complicated and, therefore, the quantitative data as well as the information on mechanisms of population of atomic levels can be obtained mainly in an experiment (see, for example, [7], [8], [10], [14], [15], [16]). The development of plasma physics, plasma chemistry, and astrophysics requires clarification of low energy atoms interaction principles which is of utmost interest for quantum theory of scattering.

The purpose of this work is the research of cross sections and mechanisms of Ar($3p^5$ 4p) atomic levels excitation at collision energies that correspond with the adiabatic approximation conditions.

SETUP AND MEASUREMENT PROCEDURE

The measurements of the cross sections at interaction of an atomic beam with a gas target were carried out by optical methods on a setup, controlled by computer [3].

The beam of neutral atoms was produced by means of charge exchange of Ar ions in its own gas in extending electrode channels of an ion source. The density of the atom beam was defined by secondary electron emission from the detector surface. The dependence of the secondary emission coefficient on the energy of atoms was measured. The flux density of fast atoms in the collision chamber reached 10^{16} particle/(m^2s). The angular divergence of the neutral beam did not exceed 3×10^{-4} sr.

The target gas pressure in the collision chamber varied from 5×10^{-2} to $2{,}5 \times 10^{-1}$ Pa, the residual gas pressure did not exceed 3×10^{-4} Pa. The gas pressure at the ion source varied in the range 8 ÷ 15 Pa.

The investigated area was at 123 mm distance from the extending electrode of the fast particles source and at 12 mm distance from the atom beam detector inlet. The distance between the detector target electrode and its input aperture was equal to 47 mm. The scattering of particles from the beam was taken into account in determination of the flux density of fast atoms.

The emission of excited particles was observed at right angle to the atomic beam; therefore, radiating particles of the beam and the target were not distinguished. The analysis of polarization was implemented using the Glan – Taylor prism. The compensators from the quarter-wave mica plates were applied to remove the influence of polarizing effect of the optical monochromator.

The measurement procedure was described in detail in the work [3].

The emission cross section was directly measured in the experiment. Note that the emission cross section is determined by measuring the spectral line intensity, the flux density of fast atoms and target particle density [17].

Taking angular divergence of the dipole radiation into account, emission cross section is equal to

$$\sigma_{ij} = \frac{4\pi}{\Omega}\frac{S(\lambda)}{K(\lambda)}\frac{G}{I_p N_t L}\frac{1}{1+\eta},$$

where Ω – a solid angle, defined by the optical system aperture; $S(\lambda)$ – photon count rate; $K(\lambda)$ – absolute sensitivity of the registration system at the given wavelength; I_p – beam intensity of the fast particles; N_t – target particle density, and L – observation zone length. The coefficient G – shows the angular distribution of dipole emission:

$$G = \frac{3-P}{3(1-P\cos^2\theta)},$$

where P – a degree of polarization, θ – an angle between a beam of fast particles and an optical axis of a system. The degree of polarization is determined by the following expression

$$P = (I_{par} - I_{per})/(I_{par} + I_{per}),$$

where I_{par} and I_{per} – intensities of components which are polarized in parallel and transversely to the beam of fast particles respectively. The value η takes into account a part of the excited fast atoms, which irradiate before leaving the observed zone. It is equal to

$$\eta = 1 - \frac{x_i}{L}\exp(-l/x_i)(1-\exp(-L/x_i)),$$

where l – the distance between the entry point of fast particles in the collision chamber and the observation zone and $x_i = \upsilon\tau_i$, where υ – colliding particle velocity, τ_i – excited state life time. The multiplier $1/(1+\eta)$ was obtained from the condition that excitation cross sections of fast and slow particles in symmetric collisions are equal.

The atom beam intensity in the observation zone was defined in the following way:

$$I_p = \frac{J}{e\gamma^0(E)\exp(\sigma_s(E)N_t d)},$$

where J – detector current, e – charge of electron, $\gamma^0(E)$ – coefficient of secondary electron emission from the detector surface under the action of fast atoms, $\sigma_s(E)$ – cross section of fast atoms reduction from atomic beam, a d – distance from the observation zone up to the detector surface.

While calculating the excitation cross sections the transition probabilities were taken from work [9], excited-states lifetimes – from [2].

RESULTS AND DISCUSSION

The excitation cross sections of Ar I $4p[3/2]_2$, $4p'[3/2]_1$, $4p'[1/2]_1$ and $4p'[3/2]_2$ levels and degree of polarization for $4s[3/2]^0_2$ – $4p[3/2]_2$ and $4s[3/2]^0_2$ – $4p'[1/2]_1$ transitions are represented in figures 1–4.

The statistical errors for the excitation cross sections and the polarization functions are represented in the figures (with probability of 95 %). The maximal estimate of systematic error could reach ±55 % when we take into account the inaccuracy of measurements of the absolute spectral sensitivity, the inaccuracy of the definition of the secondary electron yield from the detector surface of the fast particles, and the inaccuracy of the definition of the gas pressure of the target.

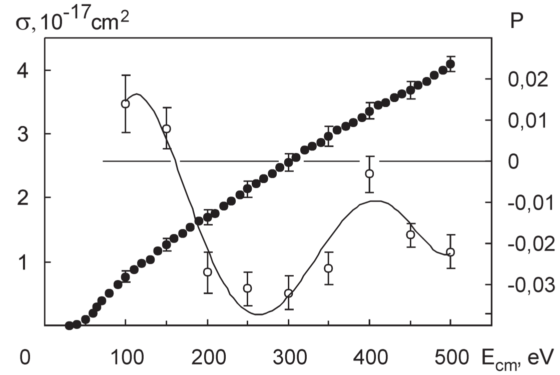


Fig. 1. Ar I $4p[3/2]_2$ level excitation cross section (•) and degree of polarization for $4s[3/2]^0_2$ – $4p[3/2]_2$ transition (o) plotted against collision energy of Ar atoms

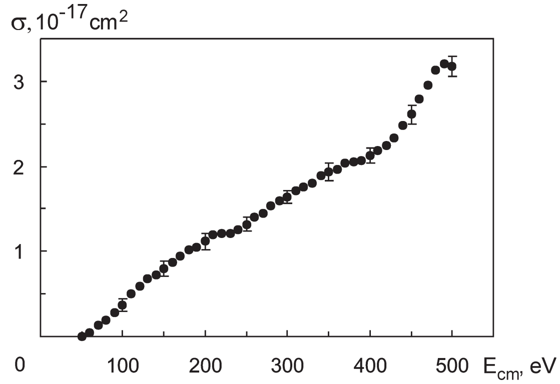


Fig. 2. Ar I $4p'[3/2]_1$ level excitation cross section plotted against collision energy of Ar atoms

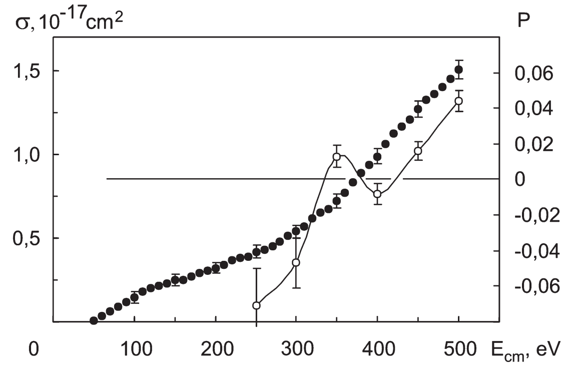


Fig. 3. Ar I $4p'[1/2]_1$ level excitation cross section (•) and degree of polarization for $4s[3/2]^0_2$ – $4p'[1/2]_1$ transition (o) plotted against collision energy of Ar atoms

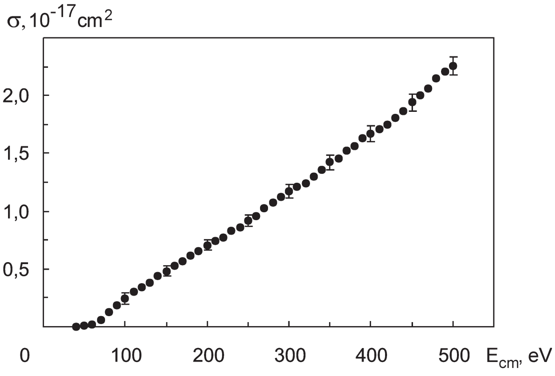


Fig. 4. Ar I 4p′[3/2]$_2$ level excitation cross section plotted against collision energy of Ar atoms

The obtained results demonstrate that the polarization degree of emission significantly depends on collision energy: when the latter goes up, the former changes its sign. The fact that the sign of the polarization degree changes with the interaction energy change, proves that the mechanism of level population changes too [6].

For instance, since the angular momentum of 4p′[1/2]$_1$ excitation level is equal to 1, the positive polarization degree shows that the magnetic sublevel σ_0, which is zero momentum projection onto internuclear axis of the Ar_2 quasimolecule, is mostly populated. Negative polarization degree, in its turn, means that there is a dense population at magnetic sublevels σ_1, corresponding to ±1 projections. Therefore, according to the data obtained, if collision energy is higher than 400 eV, the population at the mentioned above level is determined by $\Sigma_g - \Sigma'_g$ transactions. If collision energy is equal to or lower than 300 eV, level population is determined by $\Sigma_g - \Pi_g$ transactions due to radial coupling of even terms of the Ar_2 quasimolecule.

It is important to note that since output Σ_g terms of the quasimolecule are actually double excited terms, it can be assumed that the other interacting atom is excited too. This fact agrees with Wigner's law (system spin unchanged at collision) and with the research results described in works [14], [15].

The diabatic molecular orbital diagram for homonuclear system [5] and measurement results of the emission polarization lead to the following conclusion: if collision energy is less or equal to 300 eV, the population of 4p′[1/2]$_1$ level is determined by $4p\sigma - 4p\pi$ transactions due to rotational coupling at small nuclear distances. In case of higher energies, the population is governed by $5f\sigma - 5d\sigma$ transactions due to non-adiabatic radial coupling.

It is known (e. g. [1]), that at the interaction of atomic particles of the type

$$A + B \to A + B^*(n)$$

the excitation cross section of the atomic particle at fixed collision energy $\sigma \sim n^{-3}$, where n is a main quantum number. However, the obtained data have allowed to make a conclusion that in this case the emission cross sections of Ar I in spectral series depend on the main quantum number as follows: $\sigma \sim n^{-\alpha}$, where α characterizes serial dependence and varies from 12 up to 17. The values of α as a parameter of straight lines fitting ln σ(n) dependence in interval of main quantum numbers from 4 to 6 for a number of transitions are shown in table (large confidence intervals indicate that the dependence of ln σ(n) is non-linear).

The parameter α for transitions between Ar(3p^5 4s) and Ar(3p^5 np) states ($4 \le n \le 6$) at 450 eV collision energy

Transitions	α
$4s'[1/2]^0_1 - np'[1/2]_0$	12 ± 1
$4s'[1/2]^0_0 - np'[1/2]_1$, $4s[3/2]^0_2 - np[3/2]_1$, $4s\,[3/2]^0_2 - np\,[3/2]_2$	14 ± 3
$4s'[1/2]^0_0 - np'[3/2]_1$, $4s[3/2]^0_2 - np[5/2]_2$	16 ± 3
$4s\,[3/2]^0_1 - np\,[1/2]_0$, $4s[3/2]^0_2 - np[5/2]_3$	17 ± 3

These results are in agreement with our data obtained earlier under similar conditions for the Ne I $2p^5 3p - 2p^5 nd$ series ($4 \le n \le 10$) and $2p^5 3s - 2p^5 np$ series ($3 \le n \le 8$), and also with the data for He–He system [3, 4, 11–13]. Let us note that when n is small for helium α maximum value is 6, for neon it is 12 and for argon it reaches such values as 16–17. It is obvious from these data that at small n the value of α increases with the increase of the atomic mass and the number of atomic electrons of colliding atoms (figure 5).

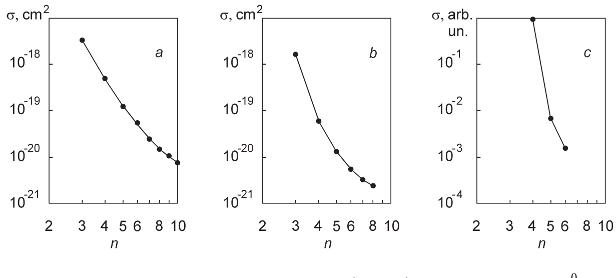


Fig. 5. The cross sections for He I 2^{1}S – n^{1}P (a), Ne I $3s[3/2]^0_1 - np[3/2]_1$ (b) and Ar I $4s'[1/2]^0_0 - np'[3/2]_1$, $4s[3/2]^0_2 - np[5/2]_2$ (c) transitions at 450 eV collision energy plotted against main quantum number

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to express our gratitude to the laboratory head I. P. Shibaev for support of this work as well as to A. S. Kashuba and A. S. Filatov.

* Работа поддержана Министерством образования РФ, программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (проект № 14.B37.21.1066, № 14.B37.21.0755), и Программой стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

REFERENCES

1. Бородин В. М. Связь между сечениями ионизации и возбуждения атомов при медленных столкновениях // Вопросы теории атомных столкновений. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. С. 72–82.
2. Веролайнен Я. Ф., Горшков В. Н. Радиационные времена жизни атомов аргона / Редкол. журн. «Вестник ЛГУ». 1988 (Рукопись деп. в ВИНИТИ № 3246-В88 от 8 апреля 1988).
3. Курсков С. Ю. Исследование процессов возбуждения He I при столкновении атомов гелия в основном состоянии: Дис. … канд. физ.-мат. наук. Петрозаводск, 1995. 188 с.
4. Курсков С. Ю., Хахаев А. Д. Спектроскопическое исследование процессов возбуждения в пучке атомов гелия // Известия АН СССР. Сер. физическая. 1989. Т. 53. Вып. 9. С. 1689−1696.
5. Barat M., Lichten W. Extension of the Electron-Promotion Model Asymmetric Atomic Collisions // Phys. Rev. A. 1972. Vol. 6. № 1. P. 211–229.
6. Blum K. Density Matrix Theory and Applications. N. Y.; London: Plenum Press, 1981. 278 p.
7. Brenot J. C., Dhuicq D., Gauyacq J. P., Pommier J., Sidis V., Barat M., Pollack E. Collisions Between Rare-Gas Atoms at Low keV Energies. I. Symmetric Systems // Phys. Rev. A. 1975. Vol. 11. № 4. P. 1245–1266.
8. Brenot J. C., Dhuicq D., Gauyacq J. P., Pommier J., Sidis V., Barat M., Pollack E. Collisions Between Rare-Gas Atoms at Low-keV Energies. II. Asymmetric Collision Systems: He–Ne, – Ar, – Kr, – Xe // Phys. Rev. A. 1975. Vol. 11. № 6. P. 1933–1945.
9. Katsonis K., Drawin H. W. Transition probabilities for argon (I) // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1980. Vol. 23. P. 1–55.
10. Kempter V., Riecke G., Veith F., Zehnle L. Study of the optical emission in collisions between rare-gas atoms: spectra of the emitted radiation // J. Phys. B. 1976. Vol. 9. № 17. P. 3081–3097.
11. Kurskov S. Yu., Khakhaev A. D. On mechanisms of He I collisional excitation in He-He system // Czechoslovak Journal of Physics. 2006. Vol. 56. P. B297–B302.
12. Kurskov S. Yu., Petrov Yu. B., Safronov Yu. A. Investigation of Atomic Spectra in Pairing Interactions of Ne Atoms // Teaching Mathematics and Physics in Secondary and Higher Education: Proceedings of the Third Inter-Karelian Conference, Petrozavodsk, Russia, 1998. Joensuu: Joensuu University Press, 1998. P. 294–296.
13. Kurskov S. Yu., Petrov Yu. B., Safronov Yu. A. Investigation of optical emission in binary low-energy Ne–Ne collisions // Electronic and Atomic Collisions: Abstracts of Contributed papers of the XXI International Conference on Physics of Electronic and Atomic Collision, 1999. Sendai, 1999. Vol. 2. P. 785.
14. Martin P. J., Riecke G., Hermann J., Zehnle L., Kempter V. Study of simultaneous emission of two photons in collisions between neon atoms using photon coincidence technique // J. Phys. B. 1987. Vol. 11. № 11. P. 1991–2001.
15. Moorman L., van Hoegaerden V., van Eck J., Heideman H. G. M. The simultaneous excitation of both collision partners to various substate combination in Ne–Ne and He–Ne collisions // J. Phys. B. 1989. Vol. 20. № 23. P. 6267–6282.
16. Tani M., Hishikawa A., Okasaka R. The g – u interference oscillations observed in the emission cross sections and the optical polarizations in He+–He collisions // J. Phys. B. 1991. Vol. 24. P. 1359–1376.
17. Wolterbeek Muller L., de Heer F. J. Electron capture into excited states by helium ions incident on noble gases // Physica. 1970. Vol. 48. P. 345–396.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 535.375+543.424

НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ СИДОРОВ
доктор физико-математических наук, заведующий сектором лаборатории электронной техники, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева Кольского научного центра РАН (Апатиты, Российская Федерация)
sidorov@chemy.kolasc.net.ru

ЕВГЕНИЯ ПЕТРОВНА ФЕКЛИСТОВА
аспирант кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
fedorova-evgenia1@yandex.ru

ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА АЛЕШИНА
кандидат физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
aleshina@psu.karelia.ru

ВЯЧЕСЛАВ МИХАЙЛОВИЧ ВОСКРЕСЕНСКИЙ
младший научный сотрудник, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева Кольского научного центра РАН (Апатиты, Российская Федерация)
voskr_vm@chemy.kolasc.net.ru

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ ЕДИНИЦ КАТИОННОЙ ПОДРЕШЕТКИ НИОБАТА ЛИТИЯ*

Методами спектроскопии комбинационного рассеяния и рентгеноструктурного анализа показано, что в катионной подрешетке легированных иттрием кристаллов ниобата лития разупорядочение обусловлено кластеризацией вдоль оси с заполненных катионами октаэдров.

Ключевые слова: ниобат лития, комбинационное рассеяние, полнопрофильный анализ рентгенограмм, кластеризация катионов

Нелинейнооптический фоторефрактивный монокристалл ниобата лития ($LiNbO_3$) имеет кислородно октаэдрическую структуру и является фазой переменного состава с широкой областью гомогенности на фазовой диаграмме, состав конгруэнтного плавления которой (Li/Nb = 0,946) не совпадает со стехиометрическим составом (Li/Nb = 1) [2], [4]. Наличие области гомогенности позволяет выращивать номинально чистые и легированные монокристаллы с разным отношением Li/Nb. При этом физические характеристики монокристалла существенно изменяются [2], [4]. В структуре кристалла $LiNbO_3$ примесные катионы могут эффективно замещать основные катионы (Li^+ или Nb^{5+}) и внедряться в вакантные октаэдры, вызывая локальные нарушения существующего порядка в расположении катионов и вакансий вдоль полярной оси кристалла [4]. Значительная концентрация таких дефектов в структуре монокристалла может приводить к деформации кислородных октаэдров и к существенным изменениям в спектре комбинационного рассеяния света (КР): к уширению всех линий спектра, появлению новых линий, проявлению многомодового поведения линий, соответствующих валентным мостиковым колебаниям атомов кислорода в октаэдрах NbO_6 [4], [5]. При этом увеличивается эффект фоторефракции, что свидетельствует о появлении в структуре дефектов с локализованными на них электронами [4]. Экспериментальные исследования и моделирование упорядочения структурных единиц и дефектов катионной подрешетки ниобата лития важны для решения фундаментальных задач большой практической значимости – создания материалов с регулируемым эффектом фоторефракции и управления физическими свойствами монокристалла с помощью лазерного излучения.

В данной работе методами спектроскопии КР и рентгеноструктурного анализа (РСА) исследованы особенности упорядочения катионной подрешетки кристаллов ниобата лития стехиометрического (R = Li/Nb = 1) и конгруэнтного (R = 0,946) составов, а также конгруэнтного кристалла, легированного Y^{3+}.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Монокристаллы $LiNbO_3$ выращивались методом Чохральского в воздушной атмосфере на установке «Кристалл-2». Легирующие примеси вводились в шихту перед получением расплава во время наплавления в тигель в виде окислов. При этом содержание посторонних катионных примесей в шихте не превышало 10^{-4} мас. %. Монокристаллы стехиометрического состава выращивались из расплава с 58,6 мол. % Li_2O. Методики приготовления шихты и выращивания монокристаллов подробно описаны в [1]. Образцы для исследований спектров КР в поляризованном излучении представляли собой параллелепипеды размерами 5 x 6 x 7 мм^3, ребра которых совпадали по направлению с кристаллографическими осями. Спектры КР возбуждались аргоновым лазером ILA-120 (λ_0 = 514,5 nm, P ≈ 200 mW) и регистрировались спектрометром Ramanor U-1000. Все измерения были выполнены при комнатной температуре. Погрешности измерения частоты (ν), ширины (S) линий составили ±1,0 см$^{-1}$, ±5,0 см$^{-1}$ соответственно.

Для проведения полнопрофильного РСА монокристаллические образцы размалывались с использованием мельницы КМ-1. Эксперименты выполнялись на установке ДРОН-6 на CuKα-излучении, монохроматор из пиролитического графита был установлен в первичных лучах. Начальный угол регистрации кривой рассеяния $2\theta_{min}$ = 3º, конечный – $2\theta_{max}$ = 140º. В областях отражений рентгенограммы регистрировались с шагом 0,02º, а в областях фона – с шагом 0,2º. Уточнение профильных и структурных характеристик проводилось при помощи программных комплексов PDWin [3] и MRIA [12] и программы полнопрофильного анализа PDR [7] в два этапа. На первом этапе были зафиксированы структурные параметры, а уточнялись профильные характеристики, в том числе периоды элементарной ячейки. На втором этапе в число уточняемых параметров последовательно включались координаты атомов, анизотропные тепловые факторы, затем коэффициенты заселенности позиций. При этом периодически уточнялись профильные характеристики рентгенограммы. При уточнении координат атомов исходили из выбора элементарной ячейки и расположения атомов в ней, предложенного в [9]. При этом ячейка строилась в гексагональной упаковке с началом координат в атоме ниобия. На такую ячейку приходятся две формульные единицы [4], [9]. Уточняемыми значениями координат атомов являются все три координаты атома кислорода и координата z атома лития. Последняя, по данным работ [9], [11], [13], для кристаллов различного состава лежит в диапазоне от 0,270 до 0,283 (в долях периода элементарной ячейки). Критериями достоверности полученных результатов служили значения брэгговского R_b и профильного R_p факторов недостоверности, рассчитываемые по стандартным формулам [3], [7], [12]. В процессе проведения полнопрофильного анализа образцов выяснилось, что результаты уточнения различными программами совпадали, но использование программы MRIA при тех же самых брэгговских факторах недостоверности позволило получить минимальные значения профильных.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Минимальной структурной единицей кристалла ниобата лития является заполненный катионом кислородный октаэдр. Вдоль полярной оси **c** кристалла чередуются заполненные и пустые (вакансионные) октаэдры. Изменение упорядочения катионов и вакансий вдоль полярной оси в структуре кристалла ниобата лития при определенных условиях может приводить к кластеризации структурных единиц катионной подрешетки [4], [5]. В спектрах комбинационного рассеяния этот эффект прежде всего проявляется в многомодовом поведении линии, соответствующей валентным мостиковым колебаниям атомов кислорода B_1-O-B_2 (B- Li^+, Nb^{5+}, примесный катион, вакансия) в кислородном октаэдре [4], [5]. В колебательном спектре кристаллов $LiNbO_3$ разного состава валентные мостиковые колебания атомов кислорода расположены в диапазоне частот 860–900 см$^{-1}$. Соответствующие деформационные колебания расположены в области частот 420–450 см$^{-1}$. Для высокоупорядоченной катионной подрешетки кристалла ниобата лития стехиометрического состава в спектре КР в соответствующих геометриях рассеяния в области валентных мостиковых колебаний наблюдается одна линия с частотой 875 см$^{-1}$ (продольные колебания симметрии A_1(LO); поперечные – симметрии E(TO)) либо с частотой 880 см$^{-1}$ (продольные колебания симметрии E(LO)) [5]. В области частот деформационных мостиковых колебаний – также одна линия с частотой 430 см$^{-1}$ (A_1(LO), E(TO)) [4], [6]. При этом частоты в зависимости от состава кристалла и степени упорядочения структурных единиц катионной подрешетки, по данным разных авторов, изменяются от 418 до 435 см$^{-1}$ [6].

Взаимодействие между катионами B и кислорода в мостиках имеет разную природу [2], [4]. Катион Li^+ размещен в своем октаэдре практически свободно, поскольку литиевый октаэдр имеет большие размеры, чем ниобиевый октаэдр: расстояние между катионом Li^+ и ближайшими ионами кислорода составляет 2,068 и 2,238 Å, тогда как соответствующие расстояния для катиона Nb^{5+} 1,889 и 2,112 Å соответственно [2]. Таким образом, если в мостике Nb_1-O-Nb_2 ионы Nb_1 связаны с ионом кислорода жесткой ковалентной связью, то связь O-Nb_2 является электростатической [2]. По этой причине в структуре $LiNbO_3$ имеются два разных расстояния ниобий – кислород, что обеспечивает большую анизотропию кристаллического поля в направлении полярной оси кристалла, которую можно варьировать, изменяя упорядочение структурных единиц катионной подрешетки путем изменения отношения Li/Nb или легирования [4]. Валентные мостиковые колебания атомов кислорода B_1-O-B_2 активны в спектре КР нецентросимметричных кислородных октаэдров BO_6 (в сегнетоэлектрической фазе $LiNbO_3$) и запрещены в спектре центросимметричных (идеальных) октаэдров [4], [5]. Поскольку характер мостиковой связи B_1-O-B_2 определяется не только жесткостью ее мостиков B-O_1 и B-O_2, но и положением катионов B_1 и B_2 в октаэдрах, то можно предположить, что частоты соответствующих линий могут служить мерой оценки положения основных и примесных катионов внутри октаэдров. В частности, если в кристаллической структуре имеются кластеры в виде неэквивалентных одноименных мостиков (то есть если катионы B_1 или катионы B_2 в разных октаэдрах расположены в разных позициях), их концентрация достаточно велика и они слабо взаимодействуют между собой, то в спектре в области частот валентных мостиковых колебаний атомов кислорода B_1-O-B_2 должны наблюдаться несколько линий с разными частотами [5]. В случае наличия в структуре только эквивалентных одноименных мостиков (высокоупорядоченная катионная подрешетка) в спектре будет проявляться только одна линия. Таким образом, в зависимости от особенностей структурного упорядочения катионной подрешетки, обусловленных изменением ее состава, кристаллы ниобата лития могут обнаруживать в колебательном спектре одно- или многомодовое поведение.

На рисунке приведены фрагменты спектров КР монокристаллов ниобата лития разного состава в области частот валентных мостиковых и деформационных колебаний атомов кислорода мостика B_1-O-B_2. Из рисунка видно, что линии, соответствующие валентным мостиковым и деформационным колебаниям атомов кислорода в мостике B_1-O-B_2, либо имеют сложный контур, либо отчетливо разделены на две линии с разными частотами ($LiNbO_{3конгр}$:Y 0,46 масс. %), то есть проявляют двухмодовое поведение. Причем эти линии наиболее узкие для кристаллов стехиометрического состава как наиболее высокоупорядоченных. Одно- или двухмодовое поведение спектра КР кристалла ниобата лития в зависимости от его состава, возможно, проявляется также и в области двухчастичных состояний акустических фононов [4], [6].

Наличие только одной линии в спектрах кристаллов ниобата лития конгруэнтного и стехиометрического составов, отвечающей валентным мостиковым и деформационным колебаниям атомов кислорода в мостике B_1-O-B_2, свидетельствует о равноценности в структуре одноименных мостиков B_1-O и B_2-O. Такая ситуация может реализоваться только в высокоупорядоченной катионной подрешетке кристалла при эквивалентном расположении подавляющего большинства соответствующих одноименных катионов внутри кислородных октаэдров. Неэквивалентность в расположении одноименных катионов, обусловленная отличием стехиометрии легированных и номинально чистых кристаллов с разным отношением Li/Nb от идеальной, нарушает скоррелированное колебательное движение ионов. Данный эффект проявляется в уширении линий всех фундаментальных колебаний с уменьшением отношения Li/Nb [4]. Неэквивалентность в расположении одноименных катионов в структуре кристалла ниобата лития особенно ярко проявляется в случае больших концентраций легирующих примесей. В частности, при больших концентрациях легирующей примеси Y^{3+} в спектре КР обнаруживается двухмодовое поведение (см. рисунок, кривая 3). Это обусловлено, на наш взгляд, наличием достаточной концентрации двух разных одноименных мостиков B_1-O и B_2-O в структуре. Такая ситуация возможна при неодинаковом расположении одноименных катионов в кислородных октаэдрах, например, вследствие кластеризации основных и примесных катионов в катионной подрешетке. Этот факт может также указывать на существование в катионной подрешетке сверхструктурной упорядоченной подрешетки таких кластерообразных дефектов.

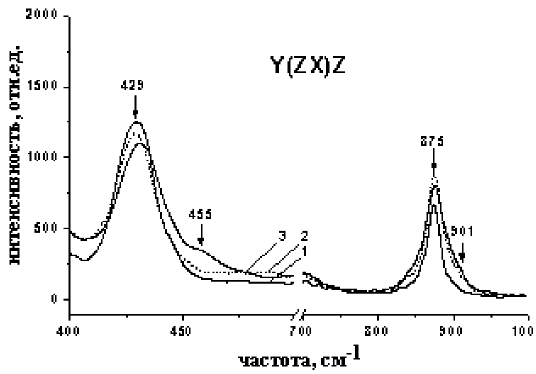


Рис. 1. Фрагменты спектров КР (поляризационная геометрия Y(ZX)X) монокристаллов ниобата лития в области валентных мостиковых и деформационных колебаний атомов кислорода в мостике B_1-O-B_2: 1 – $LiNbO_{3\ стех}$; 2 – $LiNbO_{3\ конгр}$; 3 – $LiNbO_{3\ конгр}$: Y^{3+} (0,46 масс. %)

Данные спектроскопии КР подтверждаются результатами полнопрофильного рентгеноструктурного анализа. В [8] нами были рассмотрены различные модели возможного разупорядочения катионов в кристаллах ниобата лития и уточнены структурные характеристики (координаты атомов, заселенности позиций и тепловые параметры) исследованных кристаллов. Было показано, что в кристаллах стехиометрического состава наблюдается максимальная степень упорядочения катионной подрешетки, что хорошо согласуется с результатами, полученными методом КР, и с данными работ [2], [4]. Полученные значения периодов элементарной ячейки для кристалла стехиометрического состава составили: a = 5,142(3) Å, c = 13,843(2) Å, что значительно меньше соответствующих значений для конгруэнтного кристалла (5,149(6) и 13,867(1) Å).

В кристаллах конгруэнтного состава часть катионов ниобия замещает катионы лития в их позициях, и разупорядочение в катионной подрешетке связано в первую очередь с нарушением порядка чередования катионов. Легирование катионами Y^{3+} приводит к возрастанию периода **a** до 5,154(2) Å, при этом период **c** уменьшается до 13,859(1) Å. Уточнение координат атомов кристалла, легированного Y^{3+}, показало, что катионы Y^{3+} расположены в позициях Nb^{5+} (0, 0, 0), а часть катионов Nb^{5+} – в пустых октаэдрах с координатами (0, 0, 0,1498). Такое разупорядочение структуры при легировании Y^{3+} связано с особенностями механизма внедрения этого элемента в катионную подрешетку конгруэнтного кристалла. Y^{3+}, замещая Nb^{5+} в ниобиевом положении (Nb_{Nb}), вынуждает Nb^{5+} внедряться в вакантные октаэдры, создавая кластеризацию заполненных катионами октаэдров в катионной подрешетке и тем самым увеличивая разупорядочение катионов и вакансий вдоль полярной оси. Кроме того, катионы Y^{3+} заметно искажают кислородные октаэдры, поскольку ионный радиус Y^{3+} больше, чем радиус Nb^{5+}.

Таким образом, результаты исследований структуры кристаллов ниобата лития разного состава свидетельствуют о том, что в катионной подрешетке легированных иттрием кристаллов возникает разупорядочение в виде кластеризации катионов. В результате линии колебательного спектра таких кристаллов размываются, а при превышении определенной степени разупорядочения кластеризация катионов проявляется в спектре КР в виде двухмодового поведения.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюкова И. В. Высокотемпературный синтез и модификация свойств сегнетоэлектрических монокристаллов и шихты ниобата и танталата лития: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Апатиты, 2005. 24 с.
2. Кузьминов Ю. С. Электрооптический и нелинейнооптический кристалл ниобата лития. М.: Наука, 1987. 262 с.
3. Программа «Уточнение методом Ритвельда» № 2006610292 от 27.03.2006 // Программный комплекс PDWin – 4.0. НПО «Буревестник». СПб., 2004. 24 с.
4. Сидоров Н. В., Волк Т. Р., Маврин Б. Н., Калинников В. Т. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. М.: Наука, 2003. 255 с.
5. Сидоров Н. В., Палатников М. Н., Мельник Н. Н., Калинников В. Т. Двухмодовый характер спектра комбинационного рассеяния кристалла ниобата лития // Оптика и спектроскопия. 2002. Т. 92. № 5. С. 780–783.
6. Сидоров Н. В., Палатников М. Н., Серебряков Ю. А., Лебедева Е. Л., Калинников В. Т. Особенности структуры, свойства и спектры комбинационного рассеяния света кристаллов ниобата лития различного химического состава // Неорганические материалы. 1997. Т. 33. № 4. С. 496–506.
7. Товбис А. Б. Программа уточнения параметров структур по дифракционным данным порошкового эксперимента (метод Ритвельда) / Институт кристаллографии РАН. М., 1994.
8. Федорова Е. П., Алешина Л. А., Сидоров Н. В., Чуфырев П. Г., Яничев А. А., Палатников М. Н., Воскресенский В. М., Калинников В. Т. Упорядочение катионов в кристаллах $LiNbO_3$ и твердых растворов на его основе // Неорганические материалы. 2010. Т. 46. № 2. С. 247–252.
9. Abrahams S. C., March P. Defect structure dependence on composition in lithium niobate // Acta Cryst. 1986. Vol. B42. P. 61–68.
10. Boysen H., Altorfer F. A Neutron Powder investigation of the High-Temperature structure and phase transition in $LiNbO_3$ // Acta Cryst. 1994. Vol. B50. P. 405–414.
11. Wilkinson A. P., Cheetham A. K., Jarman R. H. The defect structure of congruently melting lithium niobate // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 74 (5). P. 3080–3083.
12. Zlokasov V. B., Chernyshev V. V. MRIA – a program for a full profile analysis of powder multiphase neutron-diffraction time-of-flight (direct and Fourier) spectra // J. Appl. Crystallogr. 1992. Vol. 25. P. 447–457.
13. Zotov N., Boysen H., Frey F., Metzger T., Born E. Cation substitution models of congruent $LiNbO_3$ investigated by X-Ray and Neutron Powder Diffraction // J. Phys. Chem. Sol. 1994. Vol. 55. № 2. P. 145–152.

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Декабрь, № 8. Т. 2 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 533.9

ВАЛЕРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ ГОСТЕВ
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vgostev@psu.karelia.ru

ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ МИХАЙЛОВ
аспирант кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
evgenii.mikhailov@me.com

ПЛАЗМЕННОЕ НАНЕСЕНИЕ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ*

Рассматривается возможность получения полимерных углеродсодержащих покрытий из аренов в плазмохимических реакциях методом холодной плазмы. Проведен ряд экспериментов по осаждению углеродсодержащего материала на различные виды подложек. Выполнен анализ полученных данных.

Ключевые слова: генератор плазмы, холодная плазма, полимерные покрытия, плазмохимические реакции

ВВЕДЕНИЕ

Повышенный интерес к органическим полупроводникам связан в первую очередь со сравнительно простой технологией и низкой стоимостью продукта. Весьма важно, что использование органических молекул разной конфигурации открывает широкие возможности для модифицирования как электрофизических, так и оптических свойств материала. Область спектральной чувствительности органических соединений перекрывает весь видимый диапазон спектра [7].

Особый интерес к получению полупроводящих полимерных пленок в плазме возник в последние годы. Он вызван новыми перспективами использования органических полупроводников в современных полупроводниковых приборах, а также достоинствами метода, позволяющими получать тонкие однородные по толщине пленки на подложках, в том числе сложной конфигурации, без растворителей, без очистки полимера от окислителей, катализаторов.

Целью работы было осуществление нового способа получения углеродсодержащих покрытий из аренов в плазмохимических реакциях с помощью холодной плазмы.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для нанесения покрытий был разработан генератор плазменного потока, устройство которого представлено на рис. 1.

Конструктивно генератор микроплазменной струи изготовлен на основе автомобильной свечи, которая является его корпусом. Для подачи рабочего вещества в межэлектродный промежуток образован канал, изготовленный в результате высверливания центрального электрода свечи. Катодом устройства служит медная пластина с центральным отверстием, закрепленная на стальном диске-держателе. Анод, изготовленный из нихромовой проволоки диаметром ~1 мм, введен в канал-изолятор и закрепляется там при помощи держателя. Расстояние между анодом и выходным отверстием катода 1–2 мм.

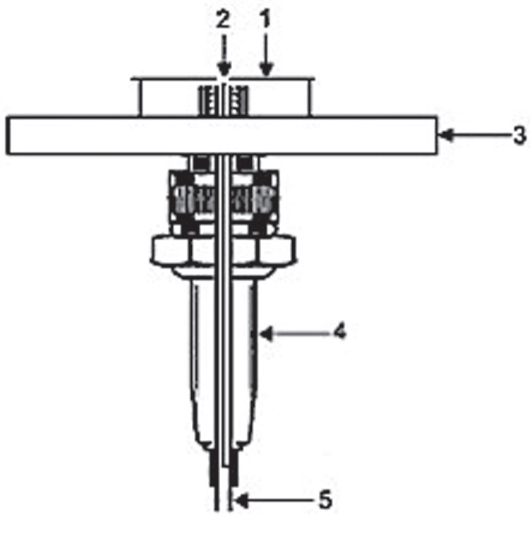


Рис. 1. Устройство газоразрядного генератора: 1 – катод устройства; 2 – игла-анод; 3 – стальной диск; 4 – изолятор; 5 – трубка подачи рабочего вещества

Принцип действия газоразрядного генератора воздушно-плазменного потока заключается в следующем. Плазмообразующий газ, в качестве которого выступает атмосферный воздух, от внешнего источника (компрессора) под давлением через входной штуцер вводится в газоразрядный генератор. Пройдя через каналы внутри устройства, он поступает в разрядную камеру генератора. Внешний высоковольтный источник питания создает электрический потенциал в разрядном промежутке игла-сопло генератора, необходимый для возникновения его пробоя. Прошедший через возникший искровой разрядный канал воздух ионизируется, и, таким образом, на выходе генератора образуется воздушно-плазменный поток. Длина плазменного факела составляет величину порядка 6 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерение вольт-амперной характеристики разряда проводилось с подачей рабочего вещества (смесь воды и нафталина, растворенного в спирте) и без него.

Экспериментальным путем установлено, что разрядный промежуток генератора пробивается при напряжениях 2200–2400 В, а стабильное горение разряда наблюдается при напряжении 900–1500 В.

Рабочий режим плазматрона, с подачей рабочего вещества, лежит в диапазоне от 35 до 50 мА. В этом диапазоне и производилось нанесение полимерных покрытий. Мощность, вкладываемая в разряд, при U = 1200 В и токе разряда I = 40 мА составляет 48 Вт. При этом плотность мощности, вкладываемой в разряд, составляет величину 8×10^3 Вт/см^3, концентрация заряженных частиц 8×10^{13} 1/см^3.

Эксперименты по исследованию распределения среднемассовой температуры вдоль воздушно-плазменного потока показали, что среднемассовая температура плазменного факела имеет значение 55 °С в центре и 46 °С на конце факела. Температура окружающей среды $T_{комн.}$ = 23 °С, напряжение горения разряда U = 1200 В, давление в разрядной камере 1,5 атм.

Исследование спектрального состава плазменного потока производилось в видимой области спектра в продольном и поперечном направлении по отношению к плазменному факелу. Напряжение горения разряда U = 1200 В, ток разряда I = 40 мА.

В случае работы генератора с использованием кристаллов нафталина, размещенных в области между керамикой и катодом устройства, и воздуха в качестве плазмообразующего газа, в зарегистрированных спектрах были обнаружены интенсивные линии O, O^+, N, N^+, C^+, полосы молекул O_2, O_2^+, O_3, N_2, NO, C_2, CH, CN, а также атомарные линии элементов материала электродов [3], [5], [6], [8]. При использовании воды вместо воздуха, кроме атомарных линий и молекулярных полос, зарегистрированных ранее, было также обнаружено сильное увеличение интенсивностей линий, в частности линий H_α. Также наблюдался интенсивный сплошной спектр в диапазоне длин волн от 325 до 750 нм.

Эксперименты по нанесению углеродсодержащих покрытий проводились при атмосферном давлении на алюминиевую подложку, в качестве источника углерода использовался нафталин, растворенный в спирте. На поверхности алюминия видны скопления кристаллов различной формы. При увеличении в 800 раз можно рассмотреть структуру образования, она представляет собой наложения прозрачных слоев материала друг на друга. В некоторых местах подложки обнаружены кристаллы диаметром порядка 20–25 мкм (рис. 2).

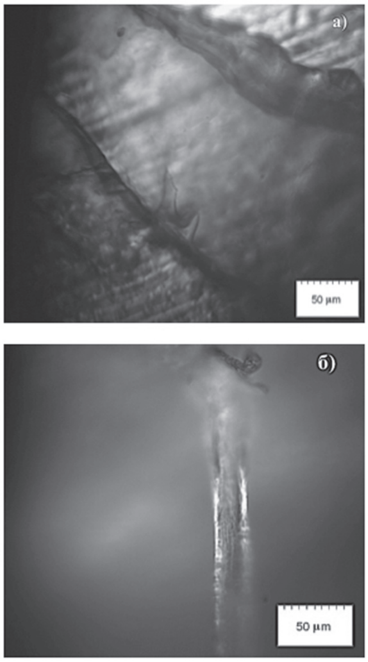


Рис. 2. Поверхность покрытия на алюминиевой подложке: а) наблюдается слоистая структура, увеличение в 800 раз; б) отдельное образование в виде кристалла, увеличение в 800 раз

С целью более детально исследовать характеристики углеродсодержащих покрытий было осуществлено нанесение на часть микросхемы. В ходе дальнейших экспериментов была снята вольт-амперная характеристика, представлена на рис. 3. Наблюдение двойной петли диэлектрического гистерезиса объясняется тем, что под влиянием электрического поля в образце происходит фазовый переход с перестройкой кристаллической структуры. Такого рода диэлектрический гистерезис тесно связан с гистерезисом при фазовых переходах [4].

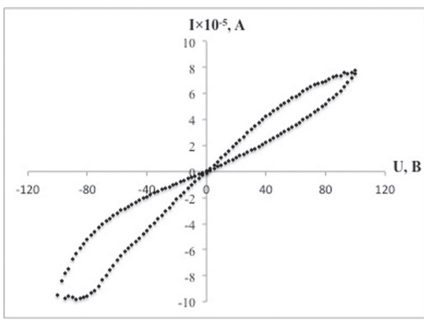


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика полимерного покрытия

Также была получена зависимость сопротивления покрытия от температуры. Анализировать температурную зависимость проводимости удобно с помощью зависимости, построенной в полулогарифмической системе координат (рис. 4).

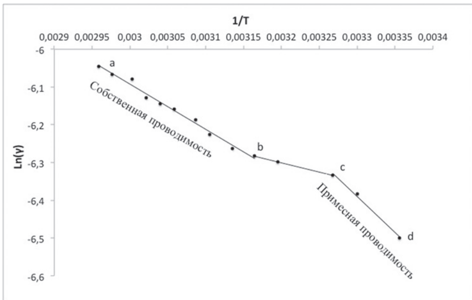


Рис. 4. Зависимость логарифма проводимости покрытия от обратной температуры

В области низких температур в полупроводнике имеет место примесная проводимость (участок d–c), увеличение которой в зависимости от температуры определяется возрастанием концентраций примесных носителей заряда. Участок c–b соответствует температурам, при которых все атомы примеси ионизированы, а собственная проводимость еще мала. При дальнейшем возрастании температуры преобладающей становится собственная проводимость, которая быстро увеличивается с изменением температуры за счет возрастания концентрации собственных носителей заряда [1].

После допирования покрытия йодом, который, по данным работы [2], используется для получения полимерных полупроводников, проводились измерения сопротивления образца при нагреве от 25 до 80 °C и при дальнейшем его охлаждении до температуры 25 °C. Вид полученной зависимости представлен на рис. 5.

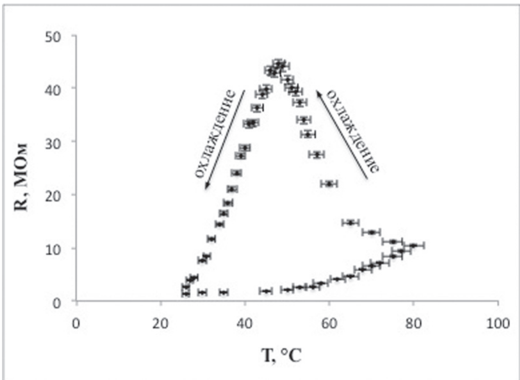


Рис. 5. Зависимость сопротивления покрытия от температуры (после допирования поверхности йодом)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом работы является изготовление газоразрядного генератора, имеющего возможность получения и регулирования на выходе мощного плазменного потока, исследование возможности получения углеродсодержащих покрытий из аренов в плазмохимических реакциях с помощью холодной плазмы. Измерены электрические, геометрические, энергетические и спектроскопические параметры газоразрядного генератора и характеристики генерируемого им плазменного потока, а также проведен анализ полученных полимерных покрытий.

Данная работа была первой по осуществлению нанесения полимерных углеродсодержащих покрытий методом холодной плазмы.

Дальнейшие пути развития используемой методики видятся в усовершенствовании технологии получения однородных углеродсодержащих пленок и исследования возможности их использования для получения полимерных полупроводников.

*Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012–2016 годы, Минобрнауки РФ, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013)», государственные контракты № 14.740.11.0895, № 14.740.11.0137, № 16.740.11.0562, № 14.740.11.1157, № 14.В37.21.0755, № 14.В37.21.0747, № 14.В37.21.1066, а также в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России и заказом Департамента научных и научно-педагогических кадров университету на оказание услуг № 2.3282.2011 и № 2.2774.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушманов Б. Н., Хромов Ю. А. Физика твердого тела: Учеб. пособие для втузов. М., 1971. 224 с.
2. Гильман А. Б., Драчев А. И. Плазмохимический метод синтеза полимерных полупроводников, их свойства и перспективы использования // Химия высоких энергий. 2006. Т. 40. № 2. С. 96–104.
3. Зейдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. Таблицы спектральных линий. М.: Наука, 1977. 800 с.
4. Иона Ф., Ширане Д. Сегнетоэлекрические кристаллы / Под ред. Л. А. Шувалова. М.: Мир, 1965. 555 с.
5. Пирс Р., Гейдон А. Отождествление молекулярных спектров / Под ред. С. Л. Мандельштама, М. Н. Аленцева. М.: ИЛ, 1949. 240 с.
6. Русанов А. К., Ильясова Н. В. Атлас пламенных, дуговых и искровых спектров элементов. М.: Госгеолтехиздат, 1958. 120 с.
7. Рябова Л. И. Органические полупроводники: физика и перспективы практических применений // Материалы VII Российской конференции по физике полупроводников «Полупроводники-2005». М., 2005.
8. Стриганов А. Н., Свентицкий Н. С. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М.: Атомиздат, 1966. 900 с.
9. Drachev A. I., Shklyarova E. I., Dorofeeva T. V., Gil'man A. B., Kuznetsov A. A. Electroconductive polymer films obtained by plasma polymerization of 1-amino-9,10-anthraquinone // Russian Chemical Bulletin. 2003. Vol. 51. № 3. P. 554.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 533.9.01, 533.9.082.5

АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ ШТЫКОВ
директор Центра коллективного пользования научным оборудованием, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
shtykoff@petrsu.ru

ЛИДИЯ АНДРЕЕВНА ЛУИЗОВА
кандидат физико-математических наук, профессор кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
alim@karelia.ru

EVALUATION OF DIFFUSION CONSTANT AS KINETIC PARAMETER OF DUSTY PLASMA STRUCTURES*

This paper is concerned with diffusion processes in dusty plasmas. The video registration method and the correlation spectroscopy method are described and their applicability is tested. These methods are applied for diffusion constant value calculation. A good agreement between values of diffusion constants calculated by the video registration method and the correlation spectroscopy method are shown.

Key words: Dusty plasma, correlation spectroscopy, diffusion constant, self-organization

INTRODUCTION

Dusty plasma is an ionized gas containing micro-sized particles of solid matter [3]. Charged particles form self-organized, dissipative, ordered crystal-like structures in plasma, so-called plasma crystals. At the same time, dusty plasma structures could be in different physical state: solid, fluid or gas-like state. Definition of the phase transitions processes in dusty plasma is one of the main purposes of studying dynamic and kinetic processes in dusty plasma physics. For instance, melting transition is observed when the gas pressure in the discharge is reduced [4], [5].

Nowadays, investigation is aimed at developing and testing new methods for measuring and computing kinetic characteristics of dusty plasma. One of the parameters that characterizes stability of a dusty plasma crystal is a diffusion constant. While studying kinetic processes in dusty plasma it is important to know the oscillation characteristics of structure particles. The diffusion constant is an order parameter of plasma crystal, and this constant determines the value of particle oscillations. If the value of the diffusion constant is known, it is possible to investigate the processes in the dusty structure at the kinetic level.

The causes of dust particles self-diffusion in the structures are described in [6]. Diffusion in dusty plasma differs from diffusion of gases, liquids and solid states. In this case diffusion is a random motion of charged dust particles, due to fluctuations of the charged particles with time. The self-diffusion depends on changes in the field of a charged particle, on plasma parameters, and particle interaction. When transition from a solid state to a liquid state and further to a gas-like state occurs, more intensive movement of particles can be observed. Therefore, the value of the diffusion constant is directly associated with the physical state of a dust cloud.

Much attention to the definition of diffusion in the dust structures is paid in [7], [8], [9], [10]. Results of diffusion constants calculations were obtained by the video registration method.

Diffusion of microparticles is a primary means of mass transport, which determines the energy loss in the dust systems and their energy characteristics [9]. The mass transfer in a dusty plasma by particle's diffusion is described in [8], [11]. The diffusion constant shows a qualitative change in the dynamic state of the structure. The results of numerical simulation of mass transfer processes are presented in [11].

Currently there are no materials related to the application of the correlation spectroscopy method to study dusty plasma, to conduct simultaneous experiments by video registration and correlation spectroscopy methods, and to compare the values obtained.

EXPERIMENTAL SETUP AND METHOD DESCRIPTION

The experiments were conducted in a setup for studying the physics of dusty plasma structures. A discharge tube is evacuated to 10^{-4}–10^{-5} torr. and filled with gas. A dust-plasma crystal is formed in glow-discharge plasma that is induced in the discharge tube. A metal container with particles (e. g. Al_2O_3, Zn, CuO or other polydisperse powder) is used to inject particles in the experiment. The dusty structure was visualized by a semiconductor laser DTL-316 and a set of lenses, forming a "laser knife". It is possible to observe the object in the scattered light. The plasma crystal is detected by the CCD camera. The signal (picture) is processed by the software, and the diffusion constant is calculated by the video registration method. A correlation spectroscopy unit consists of a photomultiplier tube (PMT), which is used as a detector of scattered radiation, a correlator, and a program that implements data acquisition in real time, processes and saves data.

As a result of the experiment we obtained diffusion coefficients calculated by the video detection method and correlation spectroscopy method.

Video registration method

The software recognizes the signal received from the video camera and determines position of each particle in a section of the structure. Structure observations for the several seconds t helps to determine trajectory of each particle. Picture frequency is 25 fps, and spatial resolution is 6 μm per pixel [1].

Diffusion constant equation:

$$D(t) = \frac{<< r(t) - r(0) >_M{}^2 >_t}{4 \cdot t}, \tag{1}$$

where $<<r(t)\text{-}r(0) > M^2 > t$ is a square displacement, $r(0)$ – position of a particle at the initial time, i. e. at the beginning of shooting, $r(t)$ – the position of a particle through time t, M – number of particles in the ensemble.

Correlation spectroscopy method

The diffusion constant is calculated on the basis of the signal autocorrelation function obtained by detecting the dust structure scattered radiation. Autocorrelation function:

$$g_2(\tau) = \overline{I_1(t) \times I_2(t+\tau)}, \tag{2}$$

where I_1 and I_2 – is the value of the signal intensity at different periods of time. If the particles are in a like viscous fluid, the autocorrelation function can be represented as:

$$\gamma(\tau) = e^{-(q^2 D\tau)}, \tag{3}$$

where $q = 2*k*sin(½\Theta)$, $k = 2\pi/\lambda$ – wave-vector, Θ – scattering angle.

Using (2) и (3) it is possible to calculate a diffusion constant.

RESULTS

To estimate reliability of diffusion values experiments were conducted in which simultaneous registration of a dusty plasma structure by correlation spectroscopy and video registration methods was performed. The diffusion constant was computed by both methods simultaneously.

The table shows that both methods give equal value of the diffusion constant, within experimental accuracy. The value of the coefficient, measured by direct detection may be underestimated due to the fact that measurements are made in “laser knife” and only horizontal and radial movements of particles are detected, while diagonal or other movements are neglected.

The results of experiments
(pressure = 80 Pa)[10], [11]

Methods	Current, mA	Gas	Particle material	$D/10^6$, cm^2/s	$\Delta/10^6$, cm^2/s
Correlation spectroscopy method	0,6–0,8	Ar	Al_2O_3	0,70–1,3	0,5
Video registration method	0,6–0,8	Ar	Al_2O_3	0,51–1,3	1,1
Correlation spectroscopy method	1,0–1,2	N_2	Zn	0,90–1,51	0,5
Video registration method	1,0–1,5	N_2	Zn	1–1,4	1,1

In addition, obtained experimental data could be compared with the calculations made in [9].

As a result, the order of constant values obtained in our experiment and in [9] is comparable, which invalids our data. Some discrepancy in experimental data can be explained by differences in experimental conditions.

CONCLUSION

In conclusion, we can say that that the correlation spectroscopy method can be used to study kinetic processes and to calculate dusty structures diffusion constants. This conclusion is made on the basis of conducted experiments on simultaneous recording of the diffusion constants by the video registration and correlation spectroscopy methods. The results obtained are within experimental accuracy, indicating reliability of the values recorded by the correlation spectroscopy method.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012–2016 годы, Гранта № RUX0-000013-PZ-06, Минобрнауки РФ, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013)», государственные контракты № 14.740.11.0895, № 14.740.11.0137, № 14.740.11.1157, № 16.740.11.0562, № 14.B37.21.0755, № 14.B37.21.0747, № 14.B37.21.1066, а также в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России и заказом Департамента научных и научно-педагогических кадров университету на оказание услуг № 2.3282.2011 и № 2.2774.2011.

REFERENCES

1. П и с к у н о в А. А. Кинетика макрочастиц в упорядоченных структурах комплексной плазмы тлеющего разряда: Дис. … канд. физ.-мат. наук. Петрозаводск, 2002. 120 с.
2. П и с к у н о в А. А. Исследование кинетики движения макрочастиц в упорядоченных плазменно-пылевых структурах // Труды международной научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения

в среде LABVIEW и технологии National Instruments». М.: Изд-во РУДН, 2007. С. 28–31.
3. F e n g Y., G o r e e J., L i u B. Solid Superheating Observed in Two-Dimensional Strongly Coupled Dusty Plasma // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 100.
4. H u b e r t u s M., M o r f i l l T. E., M o r f i l l G. E. Melting dynamics of a plasma crystal // Nature. 1996. Vol. 379. P. 806–809.
5. M e l z e r A., H o m a n n A., P i e l A. Experimental investigation of the melting transition of the plasma crystal // Phys. Rev. 1996. Vol. 53. P. 2757–2766.
6. M o r f i l l G. E., T s y t o v i c h V. N., T h o m a s H. M. Complex plasma: II. Elementary process complexe plasma // Plasma physics. 2003. Vol. 29. № 1. P. 3–36.
7. N e f e d o v A. P., V a u l i n a O. S., P e t r o v O. F. Macroparticles dynamics in glow-discharge plasma in microgravitation conditions // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2002. Vol. 122. № 4. P. 778–788.
8. V a u l i n a O. S. Macroparticles selforganizations in weak ionized plasma // All-Russia conference proceedings in low temperature plasma physics. 2001. Vol. 2. P. 111–114.
9. V a u l i n a O. S. Macroparticles diffusion and phase transition criteria for dusty structures in weak-ionized plasma // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2002. Vol. 121. № 1. P. 35–46.
10. V a u l i n a O. S., K h r a p a k S. A. Heavy-interacting macroparticles dynamics in weak-ionized plasma // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2001. Vol. 119. № 2. P. 264–271.
11. V a u l i n a O. S., P e t r o v O. F., F o r t o v V. E. Mass-transfer process modeling during small time observation in non-ideal dissipated systems // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2005. Vol. 127. № 5. P. 1153–1165.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 519.2.21

ИРИНА ВАЛЕРЬЕВНА ПЕШКОВА
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
iaminova@psu.karelia.ru

ДИАНА РЕМОВНА САНТАЛОВА
кандидат технических наук, научный сотрудник, Тартуский университет (Тарту, Эстония)
diana.santalova@ut.ee

ON APPLICATION OF WEAK REGENERATION IN SIMULATION OF COMPLEX INVENTORY CONTROL SYSTEMS*

A complex inventory control system is represented as a queuing system with the purpose to estimate steady-state characteristics for total average cost. Stochastic processes describing the behavior of this system and its regenerative structure are investigated. The weak regeneration approach for the system simulation and estimation of characteristics is used.

Key words: Weak regeneration, complex inventory control system, waiting time, renewal process, simulation

INTRODUCTION

Inventory control management is very important for every complex manufacturing or logistic distribution enterprise. Efficiency and effectiveness of inventory control management can greatly minimize the financial losses. The objective of controlling and managing the inventories is to determine and maintain the right amount of investment in the inventory and the manufacture.

One can create some safety stocks of inventory for decreasing costs associated with the possible shortage. On the other hand, the supplementary stock increases the holding costs. According to this, the typical problem that usually comes up is precise determination of the optimal volume of the ordered items as well as orders frequency. In this context an inventory order policy can generally be divided into two parts: determining the order quantity, i. e. the amount of inventory that will be purchased or produced with replenishment or determining the reordering point, when the inventory is low but can still meet the customer demands and new supplies arrive just in time before the last item is sold.

When analyzing a stochastic inventory control model [7], [8], [9], the following objective can arise: minimization of average total costs per time unit, and, as a consequence, minimization of waiting times for a demand at every location/echelon.

In this context the authors pick out the following problem: to estimate the average total waiting time for a demand in the system for a regeneration cycle and confidence interval limits for this time. A period between two consecutive regeneration points is taken as a regeneration cycle for the system. At these points a demand passes through the system without any collision with other demands, i. e. the system is idle at such points. However, this requirement is too restrictive. Moreover, efficiency of such type of simulation can be quite low, as a location cannot start to service the next demand while the service of the current demand is not completed. To avoid this, the weak regeneration points for a location/echelon will be considered, i. e. such points that a demand passes through the system without collision at every location/echelon. In other words, a location/echelon can be busy at a previous instant, but will be idle at a current instant when a demand tries to enter this echelon.

To be able to estimate the regeneration points, the inventory control system is analyzed from the viewpoint of a queuing system. The weak regenerative approach is used, which has been investigated for simulation and estimation of steady-state characteristics of queuing networks [1], [5], [6], and an inventory control system [7].

The paper is arranged as follows. The main definitions of regeneration phenomena are stated in the first part. The model of the complex inventory system under consideration is described in the second part. The third part is devoted to the regeneration structure of the given system.

DEFINITIONS OF REGENERATION PHENOMENA

Consider a d-dimensional right-continuous real-valued stochastic process $X = \{X(t),\ t \in T\}$, where $T = [0, \infty)$ or $T = \underline{N}$, with state space $\{R^d, B\}$.

The process $\overline{X}$ is called weak regenerative with regeneration points $\beta = \{\beta_1\}_{1\geq 1}$, if for each l, the post-process $\{X(t), t \geq \beta_l, (\beta_{l+k} - \beta_l)_{k\geq 1}\}$ does not depend on the pre-history $\{X(t), t < \beta_{l-1}, \beta_1, \ldots, \beta_l\}$, $1 \geq 2$ and its distribution is dependent on $l \geq 1$.

The sequence $\{\beta_1\}_{1\geq 1}$ forms the embedded renewal process $\{\alpha_1 = \beta_{1+1} - \beta_1\}_{1\geq 1}$ of regeneration cycle lengths (we assume a zero-delayed case when $\underline{\ }\beta_1 = 0$), and l-th regeneration cycle of the process $\overline{X}$ is defined as

$$G_l = \{X(t) : \beta_l \leq t < \beta_{l+1};\ \alpha_l = \beta_{l+1} - \beta_l\}.$$

In a weak regeneration case the cycles G_l are identically distributed and dependent in general. In most typical cases dependence in a queuing process may be reduced to one-dependence, in which case $\{G_{l+k}\}_{k\geq 2}$ and $\{G_{l-k}\}_{0\leq k\leq l-1}$ are independent, but G_1, G_{l+1} may be dependent. The process $\overline{X}$ is classic regenerative if the cycles $\{G_l\}_{l\geq 1}$ are independent.

Assume that a weak limit X_∞ of the basic regenerative process $\overline{X}$ exists. To estimate stationary characteristics $r = Ef(X_\infty)$, we introduce the i. i. d. variables

$$Y_l = \sum_{k=\beta_l}^{\beta_{l+1}-1} f(X_k), U_l = Y_l - r\alpha_l, l \geq 1. \quad (1)$$

Assuming $E(Y_1 + \alpha_1)^2 < \infty$. It is the weakest condition for confidence estimation based on the regenerative approach to be held, [4]. Then the following well-known ratio $r = EY_1/E\alpha_1$ holds.

In a classical regeneration case, the Central Limit Theorem (CLT) gives the following asymptotic (1 – 2γ)% confidence interval for r

$$\left[r_N \pm z_\gamma \frac{S(N)}{N^{1/2}\,\overline{\alpha}_N} \right], \quad (2)$$

where $r_N = \overline{Y}_N/\overline{\alpha}_N$, $\overline{\alpha}_N$, $\overline{\alpha}_N$ and $\overline{Y}_N$ are sample means of $\{\alpha_l\}$ and $\{Y_l\}$respectively, z_γ is selected so that $P(N(0,1) \leq z_\gamma) = 1 - \gamma$, and the sample variance $S^2(N) = \overline{Y}_N^2 + r_N^2\overline{\alpha}_N^2 - 2r_N\overline{S}_N^2 \to \sigma^2$with probability 1 as $N \to \infty$, where

$$\sigma^2 = \mathrm{E}U_1^2 = \mathrm{Var}Y_1 + r^2\mathrm{Var}\alpha_1 - 2r\cdot\mathrm{cov}(Y_1, \alpha_1). \quad (3)$$

As we have discussed the weak regeneration in a queuing system is usually reduced to the one – dependence, in which case,

$$\mathrm{E}(U_1U_2) = \mathrm{cov}(Y_1 - r\alpha_1, Y_2 - r\alpha_2) = \mathrm{cov}(Y_1, Y_2) - r\mathrm{cov}(\alpha_2, Y_1). \quad (4)$$

Thus, the CLT for the one-dependent variables gives us the following (1 – 2γ)% confidence interval for r

$$r_N \pm \frac{z_\gamma\sqrt{S^2(N) + 2(t_1(N) - r_N t_2(N))}}{\sqrt{N}\overline{\alpha}_N}, \quad (5)$$

where $t_1(N)$, $t_2(N)$ are standard estimates of $cov(Y_1, Y_2)$, and $cov(\alpha_2, Y_1)$, respectively, [1], [3]. Also with probability 1 as $N \to \infty$,

$$S^2(N) + 2(t_1(N) - r_N t_2(N)) \to \sigma^2, \quad (6)$$

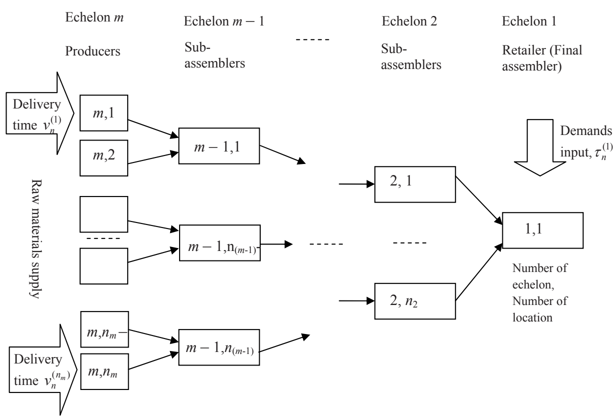
where now $\sigma^2 = \mathrm{Var}U_1 + 2\mathrm{E}(U_1U_2)$ [2].

MODEL DESCRIPTION

We consider the complex inventory control system which has to satisfy a demand for a final product and represents a manufacturing and assembly process for a subassembly. The system contains m echelons, every i-th echelon consists of n_i locations (producers), except the first echelon (a retailer), i = 2, …, m; $n_1 = 1$, $\sum_{i=1}^{m} n_i = M$. Each location produces only one component. This system is the so called convergent multi-echelon system and is characterized by the property that a location is supplied by one or more previous locations (predecessors), and supplies exactly one location (a successor), as is shown on Figure. Here the first number by every location is the number of an echelon, and the second one is the number of a location within the echelon.

The described system is able to produce K types of production. Each type of production demands a set of components which are produced at corresponding locations. For every type of production the retailer defines the route containing the required components (locations) and the amount of inventory materials supplied for every producer. The retailer immediately forwards a demand to the producers with respect to a given route. In other words, there are K routes in the system.

The order lead time consists of the production times at each location and transshipment times between locations plus possible delays (waiting times and delays of materials supply). The interarrival times of demand orders to retailer are assumed to be independent and identically distributed random variables (i. i. d.). The same we assume for production times at locations, materials supply delays and transshipment times between locations.



Multi-echelon manufacturing system

To estimate the performance of the given system we assume the following cost factors: cost function $C_z^{(i)}$for transshipment from i-th echelon to (i – 1)-th echelon per time unit, waiting time cost $C_w^{(i,j)}$per time unit at location j of echelon i, j = 1, …, n_i, i = 2, …, m and shortage cost $C_v^{(j)}$, j = 1, …, n_m. We remark that waiting time cost means cost for delays at locations due to collisions with other demands. Shortage cost is cost for delay of demands at the retailer because of inventory materials deficit.

For steady state expected cost TAC we have now:

$$TAC = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n_i} C_w^{(i,j)}\overline{W} + \sum_{i=2}^{m} C_z^{(i)}\overline{Z} + \sum_{j=1}^{n_m} C_v^{(i,j)}\overline{V},$$

where $\overline{Z}$ is the average transshipment time per location, $\overline{V}$ is the average delay time per location, and $\overline{W}$ is the average waiting time per location.

REGENERATIVE STRUCTURE

As for estimating the average values used in *TAC* the weak regeneration approach is applied, let's describe the regenerative structure of the given inventory control system.

Let $t_n^{(i)}$ be the arrival time of n-th demand at echelon i, $\tau_n^{(i)} = t_{n+1}^{(i)} - t_n^{(i)}$, $i = 1, \ldots, m$, i. i. d. interarrival times of demands at echelon i with rate λ_i.

Let $S_n^{(i,j)}$ be the production time of n-th demand at location j of echelon i, $i = 1, \ldots, m$; $j = 1, \ldots, m_i$, $S_n^{(1)}$ the production time of n-th demand at first echelon. We assume that all locations of i-th echelon have identical production time with rate $\mu_i = 1/ES_1^{(i)}$.

Let $z_n^{(i)}$ be the transshipment time of n-th demand between echelon i and echelon (i-1), $i = 2, \ldots, m$, and $v_n^{(j)}$ be the delay time of n-th demand due to materials delivery to j-th producer, $j = 1, \ldots, n_m$.

We denote $I_n = \left(\delta_n^{(i)}, \ldots, \delta_n^{(m)}\right)^m$ the route of n-th demand, $I_n \in I_K$, where I_K is a set of routes, $\delta_n^{(i)} = \left(\delta_n^{(i,1)}, \ldots, \delta_n^{(i,n_i)}\right)$, $i = 2, \ldots, m$, and $\delta_n^{(i,j)} = 1$, if j-th location of i-th echelon is part of n-th demand route, and 0 otherwise.

If the known condition

$$\rho_i = \frac{\lambda_i}{\max\limits_{j=1,\ldots,n_i} \mu_{ij}} \le 1, i = 1, \ldots, m, \tag{7}$$

holds and moreover

$$P\left(\tau_1^{(1)} > \sum_{i=2}^{m}\left(\left(\max_{j=1,\ldots,n_i} S_1^{(i,j)} + \sum_{j=1}^{n_m} v_1^{(j)}\right)\delta_n^{(i,j)} + z_1^{(i)}\right) + S_1^{(1)}\right) > 0, \tag{8}$$

then a positive recurrent renewal process of classical regeneration points of the system exists, and the system is idle at such instants. However, such points are generally too rare in real inventory systems, and the following weaker assumption

$$P\left(\tau_1^{(1)} > S_1^{(1)}\right) > 0, P\left(\tau_1^{(1)} > \max_{j=1,\ldots,n_m}\left(\left(S_1^{(m,j)} + v_1^{(j)}\right)\delta_n^{(m,j)}\right)\right) > 0,$$
$$P\left(\tau_1^{(1)} > \max_{j=1,\ldots,n_i}\left(S_1^{(i,j)}\delta_n^{(i,j)}\right)\right) > 0, i = 2, \ldots, m-1 \tag{9}$$

seems more suitable. Under assumptions (1), (3) one can construct weak regeneration points so that a demand can cross the system without collisions.

To motivate our interest to the weak regeneration approach, we remark that if $\sum_{i=1}^{m} \rho_i < 1$, then condition (2) holds and classical regeneration may be acceptable for estimation [6]. However, in a complex inventory control system with a large number of echelons the assumption $\sum_{i=1}^{m} \rho_i >> 1$ seems more natural.

An important problem which arises in simulation practice is how to identify efficiently weak regeneration points during simulation. Fortunately, one can indicate a wide class of the renovating events that allow us to do it for a given inventory system.

Consider the process $\left\{W_n = \left(W_n^{(1)}, \ldots, W_n^{(m)}\right)\right\}$, $W_n^{(i)}$ is the current unfinished workload when n-th demand arrives at echelon i, $i = 1, \ldots, m$, $n \ge 1$.

Fix some vector $a = (a_1, \ldots, a_m)$, $a_i > 0$, $i = 1, \ldots, m$ (and suppress the dependence on a_i in notations). Define the following events

$$\begin{aligned}
\Omega_n^{(a)} = \; & \Big\{\tau_n^{(1)} > a_1; \\
& S_n^{(1)} > a_2, \max_{j=1,\ldots,n_i}\left(S_n^{(i,j)} \cdot \delta_n^{(i,j)}\right) > a_i, i = 3, \ldots, m; \\
& W_{n-1}^{(1)} + S_{n-1}^{(1)} < a_1; \\
& W_{n-1}^{(1)} + S_{n-1}^{(1)} + W_{n-1}^{(m)} + \max_{j=1,\ldots,n_m}\left(S_{n-1}^{(m,j)} \cdot \delta_{n-1}^{(m,j)}\right) < a_1 + a_2; \\
& W_{n-1}^{(1)} + S_{n-1}^{(1)} + W_{n-1}^{(m)} + \max_{j=1,\ldots,n_m}\left(S_{n-1}^{(m,j)} \cdot \delta_{n-1}^{(m,j)}\right) + \\
& + W_{n-1}^{(m-1)} + \max_{j=1,\ldots,n_{m-1}}\left(S_{n-1}^{(m-1,j)} \cdot \delta_{n-1}^{(m-1,j)}\right) < a_1 + a_2 + a_m; \\
& \ldots \\
& W_{n-1}^{(1)} + S_{n-1}^{(1)} + \sum_{i=2}^{m}\left(W_{n-1}^{(i)} + \max_{j=1,\ldots,n_i}\left(S_{n-1}^{(i,j)} \cdot \delta_{n-1}^{(i,j)}\right)\right) < \sum_{i=1}^{m} a_i \Big\}.
\end{aligned} \tag{10}$$

The main idea underlying the events is that on the event Ω_n demands n, $n + 1$, … cross the inventory system along the given route without collision with demands 1, 2, …, $n - 1$. The presence of the "barriers" a_i is actually necessary to guarantee one-dependence of the regeneration cycles [1], [5], [6].

Define recursively the points

$$\beta_0^{(a)} = 0;$$
$$\beta_{n+1}^{(a)} = \min\left\{k : t_k > \beta_n^{(a)}, \text{event } \Omega_{k-1}^{(a)} \text{ occured}\right\}, n \ge 0. \tag{11}$$

Then points $\left\{\beta_n^{(\alpha)}\right\}$ form a positive recurrent renewal process of weak regeneration points for the current workload process W = $\{W_n, n \ge 0\}$.

Unfinished current workload $W_n^{(i)}$ at each echelon i can be easily computed through well-known Kiefer-Wolfowitz recursion which for our case has the following form:

$$W_{n+1}^{(i)} = \left(W_n^{(i)} + \max_{j=1,\ldots,n_i}\left(S_n^{(i,j)} \cdot \delta_n^{(i,j)}\right) - \tau_n^{(i)}\right)^+, n \ge 0.$$

CONCLUSIONS

In the present paper the authors investigated stochastic processes stipulating behavior of the complex inventory control system. The regenerative structure of the given system was described. The weak regeneration cycle length and 95 % confidence intervals for average waiting times of demands were estimated using the proposed approach. Obtained regeneration points can help a decision-maker in controlling the stochastic process of demand service. One can postpone a demand service starting time until the next regeneration point so that the total waiting time for this demand will be minimal, and average total costs per time unit will tend to minimal as well. It results in a smoother business operation and an optimized utilization of resources and manpower.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

REFERENCES

1. A m i n o v a I., M o r o z o v E. On variance reduction in weak regenerative queuing simulation // Transactions of XXIV International Seminar on Stability Problems for Stochastic Models. September 10–17, 2004, Jurmala, Latvia. Riga: TTI, 2004. P. 164–168.
2. F e r g u s o n T. A Course in Large Sample Theory. Chapman and Hall, 1996.
3. G l y n n P. Some topics in regenerative steady-state simulation // Acta Appl. Math. 1994. Vol. 34. P. 225–236.
4. G l y n n P., I g l e h a r t D. Conditions for the applicability of the regenerative method // Management Sci. 1993. Vol. 39. P. 1108–1111.
5. M o r o z o v E. Weak regenerative structure of open Jackson queuing network // Journal of Mathematical Sciences. 1998. Vol. 91. P. 2956–2961.
6. M o r o z o v E., A m i n o v a I. On steady-state simulation of some weak regenerative networks // European Transactions on Telecommunications. 2002. Vol. 13. № 4. P. 409–418.
7. P e s h k o v a I., S a n t a l o v a D. On an Optimal Inventory Problem for Multi-echelon Production System // The 11th International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication (RelStat'11). 2011, October 19–22, Riga, Latvia. Riga: TTI, 2011. P. 249–254.
8. P r a b h u N. U. Queues and Inventories. A Study of Their Basic Stochastic Processes. N. Y.: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
9. T a h a H. A. Operation Research. An introduction. Seventh edition. London: Prentice Hall, 2002.

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Декабрь, № 8. Т. 2 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 519.688

ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ БЕЗДЕЛЬНИКОВ
аспирант кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
misterfast@gmail.com

ELASTIC DEFORMATION MODELING BASED ON SURFACE GRID*

A method of modeling three-dimensional object deformation is described. This problem originated from the eye microsurgery operation framework development and thus has some advantages that can help in physical simulation. We suggest an approach that can reduce real-time deformation calculation complexity. The standard way of elastic objects' modeling with a three-dimensional tetrahedron grid does not allow achievement of the goal. Instead of using a three-dimensional grid we simulated the surface reaction by taking into account the internal volume forces' measure.

Key words: Eye surgery simulation, small elastic deformations, elasticity, plasticity, inner pressure approximation

INTRODUCTION

Computer-based medical simulation systems can provide a significant benefit for ophthalmologic microsurgical procedure training. They reproduce a number of complex medical procedures that demand high level of skill and training providing at the same time the required tactile experience. The most difficult part of microsurgery operation modeling refers to dynamic behavior modeling of elastic eye areas as a reaction to external force induced by haptic interface. Previous works in this area have shown good results in the sphere of eye microsurgery modeling [1], [2], [10].

However, when current available solutions propose realistic physical models of the organs, they actually oversimplify them. Most of the existing medical simulators use a flat model of eye areas that allows to recreate an operated object image in a form surgery usually deals with. Thus we are also faced with the problem that sometimes we cannot rely on the simulation of eye areas as thin tissues. Instead, we must consider them as volume objects and simulate tissues cutting. Thus we are developing and using a new platform that realizes new visualization and modeling features [8]. Since microsurgery operation implies rather small displacements of a surgery tool, it is necessary to model fast eye shells reactions without lags. There is a number of works [4], [5], [6], [7] where elastic objects are modeled with a three-dimensional grid. In contrast, we assume that three-dimensional elastic objects can be modeled with a surface grid assuming that internal forces are also taken into account. Some submissions allow to apply this modeling relaxation. Here is the list of the most significant ones:

- **There is no need to make an exact simulation of three-dimensional object dynamics.** In the training system model we use an abstract object, the parameters of which are unknown, but not a real one, which we need to display. Therefore, we can use only general regularities to render an object that plausibly simulates the modeling process.
- **Relatively small consecutive object transformations.** All surgery manipulations represent gradual, relatively slow motions.

ELASTIC DEFORMATION MODELING

Correct deformation model must view an object as a combination of inserted into each other interacting layers. This is usually modeled as a three-dimensional grid [3], [9]. Traditionally an explicit formulation of finite element methods is applied to model deformations of elastic objects. An object is divided into a set of sub-elements tetrahedrons. The general formulation of the finite element method is expressed by an equation:

$$M\ddot{x} + D\dot{x} + Lx = F,$$

where is the displacements of the nodes and M, D, L, F are matrixes of mass, damping, stiffness and external forces, respectively [4]. This means solving equations system for all 3D-grid vertices in real-time [11], which can affect lags and improper modeling quality. Thus we have concentrated on the modeling of object interior behavior as a reaction to external forces by tracing surface S node positions.

Consider first a simple case for which surface S is a flat rectangular grid. This grid can be viewed as a graph $G=<V, E>$, the vertexes of which are numbered with indexes (i, j):

$$V = \{(i, j) \mid -n \le i, j \le n\}.$$

Locate first these vertices V in points $A_{ij} = (x_{Aij}, y_{Aij}, z_{Aij}) = (i, j, 0)$ of three-dimensional space. We will assume that boundary grid nodes are fixed in a sense that $A_{ij} = (i, j, 0)$ if $i = \pm n$ and $j = \pm n$ presupposing that the surface is isotropic. Consider two nodes with coordinates (i, j) and (i', j') are adjacent if $|i - i'| + |j - j'| = 1$ and there are elastic links between them with an ability of tension and compression. Other presuppositions describe the relationship between the nodes in the following way. Boundary nodes positions do not depend on external and inner forces. Thus we have boundary condition. Other nodes are inner, i.e. their coordinates can be changed. Assume also that the external forces which are applied to node Aij do not depend on the node position.

Inner nodes (i, j) are linked by elastic forces Fx with horizontally adjacent node $(i \pm 1, j)$. These forces do not depend on the number of nodes, but are calculated by distance $d = xAi+1,j\ \ xAi,j$ between the nodes by the following empirical square principle:

$$\mathrm{F_x(d)} = \begin{cases}\gamma_x^{+}(d-1)^2 + \sigma_x^{+}(d-1), & if\ d-1>0\\ \gamma_x^{-}(d-1)^2 - \sigma_x^{-}(d-1), & if\ d-1<0\end{cases}.$$

In case $d - 1 > 0$ horizontal tensile deformations of surface are acting, in other case compression deformations are acting. The same conclusions are valid for node (i,j) that is linked by Fy with vertically adjacent nodes $(i, j \pm 1)$. Here $\sigma^{\pm}_{x,y}$ and $\gamma^{\pm}_{x,y}$ are some real numeric parameters. We call these forces F_x and F_y as surface forces; they are always directed tangential to the surface in the current node.

A more complex case is related to the third dimension. Actually a force, which is applied to node A_{ij} can really affect its displacement by decreasing z-coordinate of the node and possibly the displacement of deeper nodes, according to the laws of physics. The reaction force along z-axis will be compensated by surface forces, but it is obviously not enough. The balloon reaction to touching in some point actually depends on inner pressure rather than on elastic surface properties only. Thus we need to take into account the volume force as a reaction to compression or tension of elastic tissue in the interior of an object. In short, this force is generated by hypothetical inner surface levels that form an object.

Here a problem arises. It is obvious to calculate the surface node reaction in response to compression force that is orthogonal to the surface plane. Besides surface tissue compression, which is insignificant in case of small force, we must take into account the inner tissues reaction. Determine corresponding force Fz(d), where $\mathrm{d} = \mathrm{z_{Ai+1,j}} - \mathrm{z_{Ai,j}}$ is a node (i, j) moving along the z-axis, which is $\mathrm{F_z(d)} = \gamma_z^{+}\mathrm{d}^2 + \sigma_z^{+}\mathrm{d}$, if $\mathrm{d} > 0$, i. e. compression force is applied, and $\mathrm{F_z(d)} = \gamma_z^{-}\mathrm{d}^2 - \sigma_z^{-}\mathrm{d}$, if $\mathrm{d} < 0$, i. e. tensile force is applied to the node.

We associate the inner volume reaction value with a solid angle between the current and four adjacent nodes. To calculate its value we split it into two trihedral angles. The edges of these angles are calculated by vectors:

$$a_1 = [A_{i,j}, A_{i-1,j}],\quad a_2 = [A_{i,j}, A_{i-1,j}],\quad a_3 = [A_{i,j}, A_{i-1,j}];$$

$$a_1' = [A_{i,j}, A_{i-1,j}],\quad a_2' = [A_{i,j}, A_{i-1,j}],\quad a_3' = [A_{i,j}, A_{i-1,j}].$$

We determine the value of trihedral angle by formula:

$$t(a_1, a_2, a_3) = \frac{[a_1, a_2, a_3]}{|a_1||a_2||a_3| + |a_1|(a_2, a_3) + |a_2|(a_1, a_3) + |a_3|(a_1, a_2)},$$

where $[a_1, a_2, a_3]$ is a scalar triple product, (a_2, a_3) – scalar product, |a1| – norm of vector. We can calculate the value of tensile force by using the two above formulas as $F_z(t(a_1, a_2, a_3) - 2\pi) + F_z(t(a_1', a_2', a_3') - 2\pi)$, where $t - 2\pi$ is a measure of z-axis displacement. Now we can use balance equations to calculate node equilibrium positions.

CONCLUSION AND FUTURE WORK

In this paper we presented the way how to measure elastic object deformation. Here we use the standard computer object representation that is based on triangle. We illustrate on a simple case how to reduce the number of object grid vertices that are taken into account while calculating the surface reaction of the object in response to external force. This approach can be generalized to the case when we have arbitrary convex grid and apply external force to some grid nodes.

The future work will be focused on grid cutting. Here we can encounter difficulties, since we must generate new links and grid nodes for simulating tissues cutting. These new nodes will affect the changes in the above elastic object deformation modeling.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

REFERENCES

1. Балашевич Л. И., Лексунов О. Г., Кузнецов В. А., Бездельников В. А. Опыт практической реализации офтальмологического виртуального симулятора // Врач и информационные технологии. 2012. № 5. С. 36–44.
2. Debunne G., Desbrun M., Cani M.-P., Barr A. H. Dynamic real-time deformations using space & time adaptive sampling // Computer graphics, (SIGGRAPH'01 Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques). N. Y.: USE, 2001. P. 31–36.
3. Mendoza C., Laugier C. Simulating Soft Tissue Cutting using Finite Element Models // ICRA'03, IEEE International Conference On Robotics And Automation. Vol. 1. Taipei, 2003. P. 1109–1114.
4. Muller M., Gross M. Interactive Virtual Materials // GI'04 Proceedings of Graphics Interface. Ontario, 2004. P. 239–246.
5. Müller M., Mcmillan L., Dorsey J., Jagnow R. In Proceedings of the Eurographic workshop on Computer animation and simulation. N. Y., 2001. P. 113–124.
6. Nealen A., Müller M., Keiser R., Boxerman E., Carlson M. Physically Based Deformable Models in Computer Graphics // Computer Graphics Forum. 2006. Vol. 25(4). P. 809–836.
7. Nesme M., Kry P. G., Jeřábková L., Faure F. Preserving Topology and Elasticity for Embedded Deformable Models // ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2009 Conference Proceedings). 2009. Vol. 28(3).
8. Rossi J. V., Verma D., Fujii G. Y., Lakhanpal R. R., Wu S. L., Humayun M. S. Virtual Vitreoretinal Surgical Simulator As A Training Tool. Vol. 24(2). Retina, 2004. P. 231–236.
9. SOFA: Eye. Simulation of Ophthalmic Procedure [Electronic recourse]. Access mode: http://www.sofa-framework.org/projects/ophtalmo/cataract.html
10. Terzopoulos D., Platt J., Barr A., Fleischer K. Elastically Deformable Models // Computer Graphics. 1987. Vol. 21(4). P. 205–214.
11. Verma D., Wills D., Verma M. Virtual reality simulator for vitreoretinal surgery // Eye. 2003. Vol. 17. P. 71–73.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 519.114

АНАСТАСИЯ МИХАЙЛОВНА ВАЛОВА
магистрант 2-го года обучения математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
valova.a.m@gmail.com

SEARCH OF LINEAR RECURRENCE CORRELATION WITH CONSTANT INTEGER COEFFICIENTS IN PRE-SET SEQUENCE BY MEANS OF EUCLUDEAN ALGORIGHM*

Recurrences with properties mentioned in the title are common for physical problems which can be traced to the problems of enumerative combinatorics and then solved with the help of the transfer matrix method. We suggested a modification of Euclidean algorithm, which uses modular arithmetic to solve the problem.

Key words: Linear recurrence, Euclidean algorithm, Modular arithmetic

INTRODUCTION

Recurrences pointed in the title are usual for the enumerative combinatoric problems that can be solved by using the transfer matrix method [2], [3], [4], [5]. There are some software tools for finding such recurrences – the so called Computer Algebra Systems (CAS). However, the testing has shown that the ability of Mathematica 7.0/8.0 is not enough to get repeated well-known results [8]. CAS Maple 14 is more effective but the increase of the recurrence order dramatically raises the amount of RAM to be used. For example, the attempt of finding the recurrence with the order of 2086 for the number of Hamiltonian circuits in $P_{12} \times P_n$ [4] has failed the system.

The paper [1] was dedicated to the Dixon's algorithm application [7] to the problem of finding linear recurrence. It was extraordinary faster than the known software tools because of the p-adic expansions' usage. This paper shows that the Euclidean algorithm [6] modified in such a way that it uses modular arithmetic allows us to reduce the running time comparing to Dixon's algorithm in some cases.

ALGORITHM

According to the Cayley – Hamilton theorem any sequence a_1, a_2, a_3... which has been obtained by use of transfer matrix method satisfies a linear homogeneous recurrence with the constant coefficients

$$a_k = \sum_{j=1}^{N} c_j \cdot a_{k-j}, k > N, \tag{1}$$

where N is known order. The coefficients of the recurrence c_j can be found out of the system of linear equations $\mathbf{A}_N \cdot \mathbf{c}_N = \mathbf{b}_N$ where

$$\mathbf{A}_N = \begin{pmatrix} a_N & a_{N-1} & \cdots & a_1 \\ a_{N+1} & a_N & \cdots & a_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{2N-1} & a_{2N-2} & \cdots & a_N \end{pmatrix}, \mathbf{c}_N = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_N \end{pmatrix}, \mathbf{b}_N = \begin{pmatrix} a_{N+1} \\ a_{N+2} \\ \vdots \\ a_{2N} \end{pmatrix}.$$

Note that the uniqueness of the solution is ensured by the inequality in (1). The system requires first $2N$ terms of the sequence to be known. So our case is significantly different from the other known algorithms for recovering the recurrence for terms in the given sequences with unknown properties.

If N *is* unknown, then we have to consider its maximum value, assuming N to be equal to the order of the transfer matrix which can significantly exceed the real order of our relation. In the Dixon's algorithm we have to find the rank of $\mathbf{A}_N$ which shows the real order of the recurrence. The Euclidian algorithm works rather differently – it doesn't need to determine the order before calculations. Let's begin with its classical description [6].

Iterative scheme of the algorithm can be represented as follows. Let us assume

$$s^{(0)}(x) = x^{2N}, t^{(0)}(x) = \sum_{i=0}^{2N-1} a_i \cdot x^i, \text{ and}$$

$$A^{(0)}(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

then we repeat the following procedure until get $\deg t^{(r)}(x) < N - 1$

$$Q^{(r)}(x) = \left\lfloor \frac{s^{(r-1)}(x)}{t^{(r-1)}(x)} \right\rfloor$$

$$A^{(r)}(x) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -Q^{(r)}(x) \end{bmatrix} \cdot A^{(r-1)}(x)$$

$$\begin{bmatrix} s^{(r)}(x) \\ t^{(r)}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -Q^{(r)}(x) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s^{(r-1)}(x) \\ t^{(r-1)}(x) \end{bmatrix}.$$

After that, coefficients of the polynomial $f(x) = -\Delta^{(-1)} \cdot A_{22}^{(r)}(x)$ where $\Delta = A_{22}^{(r)}(0)$ correspond to the coefficients c_i of our recurrence (1).

However, the usage of rational numbers for coefficients of all involved polynomials brings extreme growth of numerator and denominator at the intermediate steps of the algorithm: the size of fractions have been grown up to one million of bits on hard tests. At the last step when calculating $f(x) = -\Delta^{(-1)} \cdot A_{22}^{(r)}(x)$, the coefficients should become integer and rather small. For example, the number of Hamiltonian cycles in $P_{10} \times P_n$ are subjected to the recurrence of order 346 [8] (sequence

A180504). The required initial numbers in the sequence of this numbers can exceed 1000 decimal digits, while the biggest coefficient c_j for the recurrence has only 70 decimal digits. Therefore, it was decided to use modular arithmetic to avoid hard fraction calculations.

Let us consider that all calculations are performed by modulo, where p is a prime integer. First, we consider some small prime number, for example $p = 2^{31} - 1$. Consider the modified Euclidean algorithm, where all polynomial operations are performed by modulo p. So, all coefficients of all polynomials at the intermediate steps of the algorithm are less than p. The modified algorithm will give us some solution $c_j^{(p)}$ by modulo p. Then we have to restore the right coefficients (if possible).

Consider that the numbers c_j lie in the range $(-\lfloor p/2 \rfloor, \lfloor p/2 \rfloor)$. So if a number $c_j^{(p)}$ is greater or equal to $\lfloor p/2 \rfloor$, then we have to decide $c_j = c_j^{(p)} - p$, otherwise $c_j = c_j^{(p)}$. On having done this, we should check the solution by substitution c_j into (1). If all the numbers a_k for $k = N, N+1, \ldots, 2N$ are satisfying the recurrence, we have found the right solution. Otherwise we have to greaten p. Good strategy is to find the smallest prime that is bigger than p^2 and to repeat all calculations again. Another strategy is to input the maximum number of bits b to the program. It finds the nearest to 2^b prime p and after having done all calculation shous if the answer is found or it isn't. On the one hand, using the second strategy the user have to select the upper bound on b by hands, while the first strategy will make all selections automatically. On the other hand, the second strategy allows to select more accurate bound on b, then the first one.

EXAMPLE

Let us consider an example: we have a sequence of integers, 1, 14, 154, 1696, 18684, 205832, 2267544, 24980352, 275195536, 3031685984, … This sequence corresponds to the number of Hamiltonian cycles in $P_5 \times P_{2n}$ for $n = 1, 2, \ldots, 10$ [9] (sequence A006865). Let us apply the algorithm performing all operation by modulo $p=13$. Let us assume

$$N = 3,\ s^{(0)}(x) = x^6,$$
$$t^{(0)}(x) = 1 + x + 11x^2 + 6x^3 + 3x^4 + 5x^5, \text{ and}$$
$$A^{(0)}(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Begin calculating

$$Q(1)(x) = 9x + 4$$
$$A^{(1)}(x) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 4 + 9x \end{bmatrix}$$
$$s^{(1)}(x) = 1 + x + 11x^2 + 6x^3 + 3x^4 + 3x^5$$
$$t^{(1)}(x) = 9 + 12x^2 + 7x^3 + 12x^4$$

We will continue until the degree of the polynomial $t(x)$ is less than $N - 1 = 3 - 1 = 2$.

$$Q^{(2)}(x) = 10x + 2$$
$$A^{(2)}(x) = \begin{bmatrix} 1 & 4 + 9x \\ 11 + 3x & 9 + 6x + 12x^2 \end{bmatrix}$$
$$s^{(2)}(x) = 9 + 12x + 7x^3 + 12x^4$$
$$t^{(2)}(x) = 9 + 2x + 2x^3$$
$$Q^{(3)}(x) = 6x + 10$$
$$A^{(3)}(x) = \begin{bmatrix} 11 + 3x & 9 + 6x + 12x^2 \\ 8 + 8x + 8x^2 & 10 + 7x + 6x^3 \end{bmatrix}$$
$$s^{(3)}(x) = 9 + 2x + 2x^3$$
$$t^{(3)}(x) = 10 + 4x.$$

We see that the degree of polynomial $t^{(3)}(x)$ is equal to 1 and it is less than 2. So we have $f(x) = \frac{A_{22}(x)}{A_{22}(0)} \bmod p = 11x + 2x^3$ and respectively we have got the recurrence $a_n = 11a_{n-1} + 2a_{n-3}$. Having done this, we should check the solution by substitution c_j into (1). In our case all the numbers a_n for $n = deg\, Q + 1, \ldots, 2N$ are satisfying the recurrence, we can argue that the solution is right. If we chose $p=7$, for example, we would get $a_n = 4a_{n-1} + 2a_{n-3}$. Obviously, this is the wrong answer. That is why we have chosen another p.

TEST RESULTS

The testing was conducted on four tasks, the first, the second and the third problems are enumeration the number of Hamiltonian circles in rectangular lattices Pm × Pn [4], the number Hamiltonian circles in thin cylinder Cm × Pn [4] and the number Hamiltonian circles in torus Cm × Cn [4] and the fourth one is the placement of kings in a rectangular chessboard of size 2m × 2n [2].

Table 1

Lattice size, the corresponding order of the relation and the spent time (s) for the problem of finding the number of Hamiltonian circles in rectangular lattices

m	N	Mathematica 8	Maple 14	Dixon	Euclid
7	18	0,3	0,5	0,0	0,0
8	66	25,9	0,5	0,0	0,1
9	104	–	2,0	0,2	0,2
10	346	–	14,2	1,7	1,6
11	671	–	555,9	32,0	32,3
12	2086	–	–	821,8	650,0

Table 2

Cylinder size, the corresponding order of the relation and the spent time (s) for the problem of finding the number of Hamiltonian circles in thin cylinder

m	*N*	Mathematica 8	Maple 14	Dixon	Euclid
8	20	0,4	0,0	0,0	0,0
9	51	8,6	0,0	0,0	0,1
10	74	92,5	1,0	0,0	0,1
11	246	–	6,8	0,7	0,6
12	303	–	26,4	1,3	1,2
13	1320	–	–	197,1	160,5
14	1514	–	–	346,8	267,5

Table 3

Torus size, the corresponding order of the relation and the spent time(s) for the problem of finding the number of Hamiltonian circles in torus

m	*N*	Mathematica 8	Maple 14	Dixon	Euclid
4	28	0,4	0,0	0,0	0,088
5	84	74,4	0,6	0,0	0,113
6	257	–	26,3	0,7	0,492
7	856	–	430,8	29,5	19,612
8	2785	–	–	1849,4	>2 GiB RAM

We have used the computer with Intel Intel Core 2 Duo E-8400 @ 3.00 GHz, 4 GiB RAM, 32-bit operating system. Tables 1, 2, 3 and 4 show the runtime of Mathematica 8, Maple 14, Dixon's algorithm [1] and the described Euclidean algorithm. The runtime is given in seconds.

Table 4

Board size, the corresponding order of the relation and the spent time (s) for the problem of placement of kings in a rectangular chessboard

m	*N*	Mathematica 8	Maple 14	Dixon	Euclid
4	17	0,4	0,0	0,0	0,049
5	31	0,5	0,0	0,0	0,045
6	75	38,9	0,0	0,2	0,194
7	124	812,6	1,5	0,1	0,255
8	307	–	15,4	1,5	2,699
9	548	–	774,7	10,5	17,413
10	1318	–	–	455,1	>2 GiB RAM

As we can see that a described Euclidean algorithm is faster than other known tools in our test cases. Of course, one could test this algorithm in other test cases and get the other results. We had to show that in case of the leak of RAM Euclidean algorithm works better with exponentially growing integer sequences.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

REFERENCES

1. Валова А. М. Получение линейного рекуррентного соотношения с постоянными коэффициентами по заданной последовательности // Материалы XV Всероссийской науч.-практ. конференции «Научное творчество молодежи», 28–29 апреля 2011 г. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2011. С. 48–51.
2. Караваев А. М. Задача о расстановке шахматных королей: материалы // Современные проблемы гуманитарных и естественных наук: Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. М., 2010. Т. II. С. 12–16.
3. Караваев А. М. Усовершенствованный метод матрицы переноса для подсчета гамильтоновых цепей на прямоугольных решетках и цилиндрах // Информационные процессы 2011. Т. 11. № 3. С. 336–347.
4. Караваев А. М. Кодирование состояний в методе матрицы переноса для подсчета гамильтоновых циклов на прямоугольных решетках, цилиндрах и торах // Информационные процессы 2011. Т. 11. № 4. С. 476–499.
5. Караваев А. М. Подсчет предгамильтоновых циклов на семействах решеточных графов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 6(119). С. 97–102.
6. Blahut R. E. Fast Algorithms for Digital Signal Processing. Addison-Wesley, 1984. 448 p.
7. Dixon J. D. Exact Solution of Linear Equations Using p-adic Expansions // Numerische Mathematik 1982. Vol. 40. P. 137–141.
8. Stoyan R., Strehl V. Enumeration of Hamiltonian Circuits in Rectangular Grids // Journal of Combinatorial Mathematics and Combinatorial Computing 1996. Vol. 21. P. 109–127.
9. The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences [Electronic resource]. Access mode: http://oeis.org

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Декабрь, № 8. Т. 2 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 519.177

АНТОН НИКОЛАЕВИЧ ВОРОПАЕВ
преподаватель кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
voropaev@petrsu.ru

ВЫВОД ФОРМУЛ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВА ЦИКЛОВ ФИКСИРОВАННОЙ ДЛИНЫ В ГРАФАХ ЛАДЬИ*

Рассматривается техника символьных вычислений по явным формулам для подсчета циклов фиксированной длины в неориентированных графах. Детали аналитических преобразований сумм, входящих в формулы, иллюстрируются на примере семейства графов ладьи на досках размера $N \times N$. На основе явных выражений для количества циклов длин 3, 4, …, 7 выведены многочлены, описывающие зависимость данных величин от N в случае графов ладьи.

Ключевые слова: подсчет циклов фиксированной длины в неориентированных графах, графы ладьи

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от многих других подходов к подсчету циклов, явные формулы [1], [4], [5], [6] позволяют свести определение числа циклов длины k к вычислению количества произвольных маршрутов длины не более k с фиксированными начальными и конечными вершинами. Подсчет маршрутов без ограничения на их структуру в виде различия вершин обычно оказывается более простой задачей по сравнению с определением самого количества циклов. В частности, при достаточно регулярной структуре графов некоторого параметризованного семейства удается аналитически выразить зависимость количества маршрутов от значения параметра. Воспользовавшись далее явными формулами, можно вывести выражение и для числа циклов. Возможность таких символьных вычислений отмечалась ранее в [3], однако подробно в литературе не освещалась.

Целью настоящей работы является демонстрация основных способов аналитического преобразования сумм, входящих в явные формулы. Все необходимые построения иллюстрируются на примере семейства графов ладьи, соответствующих доскам размера $N \times N$.

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Графом ладьи для доски размера $N \times N$ будем называть граф, вершины которого соответствуют клеткам доски, а ребра – парам клеток, таким что ладью можно переставить с одной клетки на другую за один ход. Определенный таким образом граф содержит N^2 вершин, $N^2(N-1)$ ребер и является регулярным. Степень каждой вершины графа ладьи равна $2(N-1)$.

Маршрутом длины k называется упорядоченный набор $(v_1; v_2;\ldots; v_{k+1})$ вершин графа, в котором каждые две соседние вершины v_i и v_{i+1} смежны. Маршрут длины не менее 3, для которого все вершины $v_1, v_2, \ldots, v_k$ различны, а $v_{k+1} = v_1$, называется циклом. При подсчете циклы, отличающиеся только выбором начальной вершины или направления обхода вершин, будут рассматриваться как один.

Количество циклов длины k обозначим символом c_k, а буквы n и A будем использовать для обозначения порядка (числа вершин) и матрицы смежности графа ладьи. Элементы матриц A и A^k записываются как a_{ij} и $a_{ij}^{(k)}$. Величина $a_{ii}^{(2)}$ равна степени вершины i и будет обозначаться символом d_i.

ЯВНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ПОДСЧЕТА ЦИКЛОВ

Явные формулы представляют собой комбинации сумм, члены которых являются произведениями элементов матрицы смежности и ее степеней. Например, количество циклов длин 3, 4, …, 7 в произвольном графе можно определить по следующим формулам [1], [2], [5], [6]:

$$
\begin{aligned}
&c_4 = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{n}\left(a_{ii}^{(4)} - 2d_i^2 + d_i\right), \quad c_5 = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{n}\left(a_{ii}^{(5)} - 5a_{ii}^{(3)}(d_i - 1)\right),\\
&c_3 = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{n}a_{ii}^{(3)}, \quad c_6 = \frac{1}{12}\sum_{i=1}^{n}a_{ii}^{(6)} - \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{n}\left(\left(a_{ii}^{(3)}\right)^2 + 2a_{ii}^{(4)}(d_i - 1)\right) +\\
&\quad + \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{n}\left(d_i\left(d_i^2 - 3d_i + 1\right) - a_{ii}^{(3)}\right) + \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(3\left(a_{ij}^{(2)}\right)^2 a_{ij} + a_{ij}^{(3)}\right), \qquad (1)\\
&c_7 = \frac{1}{14}\sum_{i=1}^{n}a_{ii}^{(7)} - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\left(a_{ii}^{(5)}(d_i - 1) + a_{ii}^{(3)}\left(a_{ii}^{(4)} - 2d_i^2 + 11d_i - 8\right)\right) +\\
&\quad + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(a_{ij}^{(2)}a_{ij}\left(\left(a_{ij}^{(2)}\right)^2 + 3a_{ij}^{(3)} + d_i d_j - 4a_{ij}^{(2)}\right) + a_{ij}^{(2)}a_{jj}^{(3)}\right).
\end{aligned}
$$

Символьное преобразование выражений (1) для заданного параметризованного семейства графов возможно при наличии формул, описывающих зависимость величин $a_{ij}^{(k)}$ от параметра семейства. В следующем разделе представлены такие формулы в случае графов ладьи.

ПОДСЧЕТ МАРШРУТОВ В ГРАФАХ ЛАДЬИ

Количество маршрутов длины k, соединяющих фиксированные вершины (клетки) i и j, в графе ладьи определяется одним из трех вариантов взаимного расположения i и j: клетки совпадают; клетки различны, но расположены в одном ряду доски; клетки расположены в разных рядах.

В случае $i = j$ значение $a_{ij}^{(k)}$ выражается следующей общей формулой.

Утверждение 1. *Для всякого натурального* $k \geq 2$

$$a_{ii}^{(k)} = \frac{1}{N^2}\left(2(N-1)(N-2)^k + 2^k(N-1)^k + (-2)^k(N-1)^2\right). \quad (2)$$

Доказательство. Пусть $W_S(l)$, где $S \subset \{1;2;\ldots;l\}$, – множество всех замкнутых маршрутов ладьи длины l с фиксированной начальной клеткой, в которых ходы с номерами из множества S выполняются в горизонтальном направлении, а остальные ходы – в вертикальном направлении. Тогда, очевидно, множество $W_S(l)$ равномощно произведению $W_\varnothing(|S|) \times W_\varnothing(l-|S|)$ (весь маршрут разбивается на подпоследовательности из горизонтальных и вертикальных ходов), и

$$a_{ii}^{(k)} = \sum_{S\subset\{1;2;\ldots;k\}} |W_S(k)| = \sum_{S\subset\{1;2;\ldots;k\}} |W_\varnothing(|S|)| \cdot |W_\varnothing(k-|S|)| = = \sum_{l=0}^{k}\binom{k}{l} \cdot |W_\varnothing(l)| \cdot |W_\varnothing(k-l)|, \quad (3)$$

если по определению считать, что $|W_\varnothing(0)| = 1$.

Обозначим величину $|W_\varnothing(l)|$, равную количеству замкнутых маршрутов ладьи длины l с фиксированной начальной клеткой *в одном ряду* доски, символом $f(l)$. Для небольших значений $l = 0, 1, 2$ имеем

$$f(0) = 1, \quad f(1) = 0, \quad f(2) = N-1, \quad (4)$$

а при $l > 2$ величину $f(l)$ можно выразить через $f(l-1)$. Для очередного хода ладьи существует $N-1$ вариантов, а l-м ходом ладья сумеет попасть в начальную клетку, если только она не оказалась именно в этой клетке через $l-1$ ход:

$$f(l) = (N-1)^{l-1} - f(l-1). \quad (5)$$

Решение рекуррентного соотношения (5) с начальными условиями (4) описывается следующей явной формулой:

$$f(l) = \frac{1}{N}\left((N-1)^l + (-1)^l(N-1)\right). \quad (6)$$

Подстановка (6) в (3) и упрощение результата дает искомую формулу (2). □

Выражение (2) позволяет сразу же вычислить путем подстановки в (1) любые суммы с одним индексом. В частности, данного соотношения достаточно для выражения величин c_3, c_4 и c_5 через параметр N. Формулы же для c_6 и c_7 помимо диагональных элементов d_i, $a_{ii}^{(3)}$, $a_{ii}^{(4)}$, …, $a_{ii}^{(7)}$ включают недиагональные элементы $a_{ii}^{(2)}$ и $a_{ij}^{(3)}$. Значения указанных элементов представлены в следующем утверждении.

Утверждение 2. *Для различных клеток i и j*

$$a_{ij}^{(2)}, a_{ij}^{(3)} = \begin{cases} 2,\ 6(N-2), & \text{если } i \text{ и } j \text{ расположены в разных рядах;} \\ N-2,\ N^2, & \text{если } i \text{ и } j \text{ расположены в одном ряду.} \end{cases} \quad (7)$$

Доказательство. Случай $a_{ij}^{(2)}$. Если клетки i и j находятся в разных рядах доски, то первым ходом ладью необходимо переместить в один ряд с клеткой j, а вторым ходом – в саму клетку j. Для первого хода имеются две возможности: по горизонтали или по вертикали. В случае же, когда i и j находятся в одном ряду, то после первого хода ладья должна остаться в этом же ряду, но не попасть в саму клетку j. Количество вариантов осуществления такого хода равно $N-2$, по числу клеток ряда, за исключением i и j.

Случай $a_{ij}^{(3)}$. Когда клетки i и j расположены в разных рядах доски, ладья после первого хода попадет в один ряд с j (2 варианта) или вновь окажется в разных рядах с j ($2(N-2)$ вариантов). В первом случае останется $N-2$ возможности попасть в j за два хода, а во втором – только 2 способа. Общее количество маршрутов составляет $2 \cdot (N-2) + 2(N-2) \cdot 2 = 6(N-2)$. Если же клетки i и j расположены в одном ряду, то в результате первого хода будет иметь место одна из трех ситуаций: ладья находится в клетке j (1 вариант); в одном ряду с j, но не в самой клетке j ($N-2$ варианта); в разных рядах с j ($N-1$ вариант). Остается переместить ладью в клетку j за два хода: $1 \cdot 2(N-1) + (N-2) \cdot (N-2) + (N-1) \cdot 2 = N^2$. □

При вычислении двойных сумм непосредственной подстановкой выражений (2) и (7) в общий член суммы не обойтись, так как взаимное расположение вершин i и j меняется по мере того, как они независимо друг от друга пробегают всевозможные значения от 1 до n. Необходимо предварительно разбить область суммирования таким образом, чтобы в рамках каждой из подобластей сохранялось постоянное взаимное расположение вершин i и j, а следовательно, и значение общего члена суммы.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ДВОЙНЫХ СУММ ДЛЯ ГРАФОВ ЛАДЬИ

В случае двух индексов возникают три подобласти суммирования в соответствии с вариантами взаимного расположения, перечисленными в предыдущем разделе.

Утверждение 3. *Пусть $f(i; j)$ – многочлен, составленный из величин $a_{ij}^{(k)}$, а f_0, f_1 и f_2 – значения $f(i; j)$ на тех наборах индексов, для которых клетки i и j расположены в разных рядах (t = 0); в одном ряду, но различны (t = 1); совпадают (t = 2). Тогда*

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} f(i;j) = N^2 \cdot \left(f_2 + 2(N-1)f_1 + (N-1)^2 f_0\right). \quad (8)$$

Доказательство. Для каждой клетки i насчитывается $2(N-1)$ клеток, расположенных в одном горизонтальном или вертикальном ряду с i. Клетки же, не попадающие в один ряд с i, заполняют часть доски, получаемую вычеркиванием рядов, которые проходят через клетку i. Количество таких клеток равно $(N-1)^2$. □

Применительно к суммам (1), за исключением последних слагаемых в формулах для c_6 и c_7, правило (8) существенно упрощается, так как благодаря наличию множителя a_{ij} всегда $f_2 = f_0 = 0$.

Следствие. $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\widetilde{f}(i;j)a_{ij} = 2N^2(N-1)\widetilde{f}_1$.

ФОРМУЛЫ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВА ЦИКЛОВ В ГРАФАХ ЛАДЬИ

На основе явных формул для подсчета циклов, используя соотношение (7) непосредственно, а также с применением правила (8), можно аналитически выразить зависимость величин c_3, c_4, …, c_7 от параметра N для графов ладьи.

Утверждение 4. *Количество циклов длин 3, 4, …, 7 в графах ладьи на доске N × N выражается формулами*:

$$c_3 = \frac{F}{3}, \quad c_4 = \frac{1}{4}N^2(N-1)(N^2-4N+5),$$
$$c_5 = \frac{F}{5}(N^2-2N+7), \quad c_6 = \frac{F}{6}(N+2)(N^2+2N-11), \tag{9}$$
$$c_7 = \frac{F}{7}(N^4+24N^3-133N^2+134N+94),$$
$$\text{где} \quad F = N^2(N-1)(N-2).$$

Для случаев, когда значение длины цикла больше 7, представленного выше набора правил преобразования сумм недостаточно, поскольку в соответствующих явных формулах встречаются суммы кратности 4 и более [2], [3], [4]. Кроме того, увеличиваются степени матрицы смежности, недиагональные элементы которых участвуют в формулах. Однако идея разбиения областей суммирования обобщается на суммы произвольной кратности, а значения недиагональных элементов также могут быть вычислены в общем виде, наподобие (2). В частности, можно показать, что для графов ладьи значения всех сумм, участвующих в явных формулах, являются многочленами от N. Следовательно, в силу полиномиальности самих формул для c_k зависимость величины c_k от N в случае графов ладьи также всегда описывается многочленом от N. Общий способ разбиения сумм произвольной кратности предполагается детально рассмотреть в отдельной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в данной работе техника символьных вычислений по явным формулам не ограничена семейством графов ладьи и применима к разнообразным классам других графов с достаточно регулярной структурой. Основная ценность предложенного подхода к аналитическому подсчету циклов на основе явных формул состоит в том, что сами формулы уже «содержат» существенную информацию о числе циклов и остается лишь предоставить вспомогательные данные, получение которых не столь затруднительно по сравнению с выводом выражений для количества циклов из первых принципов.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воропаев А. Н. Подсчет простых циклов фиксированной длины в графах. Явные формулы для случая малых длин // Научное творчество молодежи: Материалы XIII Всеросс. науч.-практ. конф. (г. Анжеро-Судженск, 14–15 мая 2009 г.). Томск: Изд-во Томского ун-та, 2009. Ч. 1. С. 21–23.
2. Воропаев А. Н. Вывод явных формул для подсчета циклов фиксированной длины в неориентированных графах // Информационные процессы. 2011. Т. 11. № 1. С. 90–113.
3. Воропаев А. Н., Перепечко С. Н. Количество простых циклов фиксированной длины в неориентированном графе. Явные формулы в случае малых длин // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. «Математика, информатика, физика». 2012. № 2. С. 5–11.
4. Alon N., Yuster R., Zwick U. Finding and counting given length cycles // Algorithmica. 1997. Vol. 17. № 3. P. 209–223.
5. Chang Y. C., Fu H. L. The number of 6-cycles in a graph // The Bulletin of the Institute of Combinatorics and Its Applications. 2003. Vol. 39. P. 27–30.
6. Harary F., Manvel B. On the number of cycles in a graph // Matematický časopis. 1971. Vol. 21. № 1. P. 55–63.

Декабрь, № 8. Т. 2 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 519.115.8

АРТЕМ МИХАЙЛОВИЧ КАРАВАЕВ
преподаватель кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
karavaev@flowproblem.ru

NUMBER OF PHYSICAL CONNECTIVITY STATES IN TRANSFER MATRIX METHOD FOR ENUMERATION OF HAMILTONIAN CIRCUITS IN RECTANGULAR LATTICE*

We obtained a formula for the exact number of physical connectivity states, which are constructed by the transfer matrix method for the enumeration of Hamiltonian circuits' number in a $P_m \times P_n$ lattice. We prove that the number of physical states is asymptotically square root of m times smaller than the Motzkin number. The obtained formulae allowed us to get a better understanding the complexity of the problem.

Key words: The transfer matrix method, Hamiltonian circuits, circuits in a lattice

INTRODUCTION

The enumeration of all possible Hamiltonian circuits in grid graphs is one of the most important and fundamental problems of combinatorics. It has many applications in mathematics, physics, biology, etc. One of the most famous applications is connected with the polymer science. Hamiltonian circuits correspond to conformations of macromolecules [2]. There are different ways to solve this enumeration problem, but the best way is to use the so-called transfer matrix method [1], [4]. Unfortunately, application of this method requires a huge amount of RAM on your PC because the order of a transfer matrix grows apparently with the increase of the parameter m of the grid $P_m \times P_n$. The number of all possible connectivity states is given by Motzkin numbers:

$$\mathrm{Mot}(m) = \sum_{k=0}^{\lfloor m/2 \rfloor} \frac{1}{k+1}\binom{2k}{k}\binom{m}{2k} \sim \sqrt{\frac{3}{4\pi m^3}} \cdot 3^m \text{, while } m \to \infty.$$

One can see that increasing m by 1 extends the number of connectivity states approximately three times. Kloczkowski and Jernigan [4] have recently suggested a rule that helps to divide the set of all connectivity states into the so-called physical and unphysical states. Our goal is to obtain a formula for the exact number of physical states. We strongly convinced that such a formula will help to understand the real bounds on m and n for which can be calculated the number of Hamiltonian circuits in $P_m \times P_n$ lattice. Let us recall that the biggest lattice with the known value of circles is $P_{22} \times P_{100}$ [1], [3]. We assume that the reader is familiar with the transfer matrix method for enumeration of the number of Hamiltonian circuits in $P_m \times P_n$ [1], [4]. We use the definitions given in [4] and after some necessary explanations immediately start with the construction of the formulae.

FORMULAE CONSTRUCTION

We can imagine the construction of any Hamiltonian circuit as an iterative procedure of appending the vertical and horizontal bones level by level from the bottom to the top of a lattice. Let's fix the "cut line" as it is shown in fig. 1. The part of the circuit lying below the cut line consists of two disjoint chains. Another part of the circuit (gray solid line in fig. 1) lying over the cut line is just a variant of extending the chains. The connectivity state is a level P_m of $P_m \times P_n$ lattice with those sites connected by arc, which belong to the end points of the same chains.

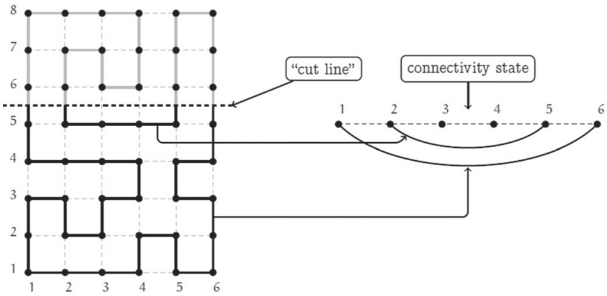


Fig. 1. The connectivity state in $P_6 \times P_8$ lattice

If we imagine all possible ways of connecting sites in a level P_m, we will get Mot(m) number of all connectivity states [4]. But not all of the states are physical and correspond to some cut of realy existing Hamiltonian circuit. Let us describe the rule for identifying physical and unphysical states with some inconspicuous variations from [4].

First, let us consider that m is even and fix some connectivity states with m sites. Let us assign parities "+1" and "-1" one by one to all the sites. Then let us sum the parities of all the unconnected sites. If the sum is equal to zero then the connectivity state is physical, otherwise it is unphysical. If m is odd then we act the same way, but the sum of parities of all the unconnected sites should be equal to "+1" or "-1". For example, the connectivity states in fig. 2(a, c, e, f) are physical, but the connectivity states in fig. 2(b, d) are unphysical.

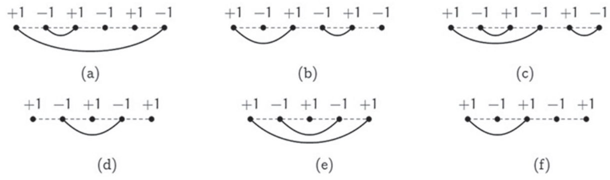


Fig. 2. Physical and unphysical states: (a), (c), (e) and (f) are physical, (b) and (d) are unphysical

Let us count the number of physical states corresponding to the described rule. Begin with even m. Consider $2k$ of m sites connected. Due to the rule k sites have the parity "+1" and k sites have the parity "-1". One can choose $2k$ sites with this property from m by $\binom{m/2}{k}^2$ ways. On having done this a connection of the chosen sites in $\frac{1}{k+1}\binom{2k}{k}$ ways (Catalan numbers) can be made. As a result, we get the number of physical states summing for all possible k:

$$A(m)=\sum_{k=0}^{m/2}\frac{1}{k+1}\binom{2k}{k}\binom{m/2}{k}^2 \sim \frac{9\sqrt{3}}{2\pi m^2}\cdot 3^m, \text{ while } m\to\infty.$$

As we can see the number of physical states is asymptotically $\sqrt{m}$ times smaller than the number of all the connectivity states Mot(m).

Now let us suppose m is odd. If the sites are numbered from "+1" then we have more "positive" sites rather than "negative" ones by one. Let us consider again $2k$ of m sites are connected. First we should make the sum of parities of unconnected states equal plus one. Then we have to choose k site from $\lceil m/2 \rceil$ "positive" sites and k sites from $\lfloor m/2 \rfloor$ "negative" sites. The Catalan number gives the number of ways to connect the chosen sites:

$$B(m)=\sum_{k=0}^{\lfloor m/2 \rfloor}\frac{1}{k+1}\binom{2k}{k}\binom{\lceil m/2 \rceil}{k}\binom{\lfloor m/2 \rfloor}{k}\sim\frac{27\sqrt{3}}{2\pi m^2}\cdot 3^m.$$

The same way to it, if we need to make the sum of all parities of unconnected states equal minus one, we have to choose $k + 1$ site from $\lceil m/2 \rceil$ "positive" sites and $k - 1$ sites from $\lfloor m/2 \rfloor$ "negative" sites:

$$C(m)=\sum_{k=0}^{\lfloor m/2 \rfloor}\frac{1}{k+1}\binom{2k}{k}\binom{\lceil m/2 \rceil}{k+1}\binom{\lfloor m/2 \rfloor}{k-1}\sim\frac{27\sqrt{3}}{2\pi m^2}\cdot 3^m.$$

The number of all physical states for odd m is equal to $B(m) + C(m)$.

DISCUSSION

The determined formulae give us the exact number of physical states. As we can see, the number of such states is asymptotically $\sqrt{m}$ smaller than the known upper bound Mot(m). Instead of being reduced, the number of physical states grows very fast. Of course, it is possible to halve the number of physical states using the central reflection of P_m but it will hardly help to considerably reduce the size of the transfer matrix. Our formulae help to understand how many resources you will need to calculate the exact number of Hamiltonian circuits in a given lattice $P_m \times P_n$. For example, the nearest unsolved problem is the number of Hamiltonian circuits in $P_{24} \times P_{24}$. Our formula gives $A(24)$ = 1 079 364 105 physical states. This is 3 times less than Mot(24) = 3 192 727 797. Number $A(24)$ can be halved (if we don't take a small number of symmetrical states into account), but nevertheless it is not enough to start counting on home PC.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

REFERENCES

1. Караваев А. М. Кодирование состояний в методе матрицы переноса для подсчета гамильтоновых циклов на прямоугольных решетках, цилиндрах и торах // Информационные процессы. 2011. Т. 11. № 4. С. 476–499.
2. Cloizeaux J., Jannink G. Polymers in Solution: Their Modelling and Structure. Oxford: Clarendon Press, 1990. 928 p.
3. Hamilton cycles @ FlowProblem web-project [Electronic resource]. Access mode: http://flowproblem.ru/cycles/hamilton-cycles
4. Kloczkowski A., Jernigan R. L. Transfer matrix method for enumeration and generation of compact self-avoiding walks. I. square lattices // Journal of Chemical Physics. 1998. Vol. 109. P. 5134–5146.

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Обращаем ваше внимание на то, что в связи с включением журнала в международные реферативные базы меняются требования к оформлению статей с 1 января 2013 года.

Представляемые рукописи должны соответствовать тематике журнала и содержать материалы, не опубликованные ранее в других изданиях.

Статья предоставляется в распечатанном виде на бумаге формата А4 (в двух экземплярах) и в электронном виде. Печатная версия статьи подписывается всеми авторами.

Статья набирается в текстовом редакторе **Microsoft Word** и сохраняется с расширением .doc. **Объем** оригинальной и обзорной статьи не должен превышать 0,5–0,7 печатного листа. **Поля**: верхнее и нижнее – 2 см, правое и левое – 3 см. Абзацный отступ – 0,5 см. **Шрифт**: Times New Roman, размер – 14 пунктов, аннотация, список литературы – 12 пунктов, межстрочный интервал – полуторный. Нумерация страниц – справа внизу страницы.

Статья должна состоять из следующих элементов на **русском** и **английском** языках:

УДК (индекс универсальной десятичной классификации) в левом верхнем углу.

Сведения об авторе (имя, отчество, фамилия автора (-ов) полностью; ученая степень и звание; место работы: вуз, факультет, кафедра; должность; электронный и почтовый адреса, контактные телефоны).

Название статьи жирным шрифтом заглавными буквами.

Аннотация (объем от 120 до 250 слов) является кратким резюме большей по объему работы. Аннотация может публиковаться самостоятельно и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации. Она является основным источником информации в отечественных и зарубежных информационных системах и базах данных, индексирующих журнал. Структура аннотации должна повторять структуру статьи и включать введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации. Следует избегать лишних фраз (например, «автор статьи рассматривает...»), не включать несущественные детали, применять значимые слова из текста статьи. В тексте аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций. Аннотация предназначается для компетентной аудитории, включая международную, поэтому можно использовать техническую (специальную) терминологию дисциплины. Текст аннотации должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.), либо разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать один из другого. Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, то есть “The study tested”, но не “It was tested in this study”.

Ключевые слова – от 3 до 8 слов (или словосочетаний, несущих в тексте основную смысловую нагрузку).

Список литературы должен быть представлен на отдельных листах в 2 вариантах:

1) на русском языке **в соответствии с ГОСТ 7.1-2003.** Цитируемая в статье литература (автор, название, место, издательство, год издания и страницы (от и до или общее количество) приводится в алфавитном порядке, сначала отечественные, затем зарубежные авторы;

2) список литературы должен быть записан на языке оригинала латинскими буквами (References) Если русскоязычная статья была переведена на английский язык и опубликована в английской версии, то необходимо указывать ссылку из переводного источника. Как правило, библиографические описания российских публикаций составляются в такой последовательности: авторы (транслитерация), перевод названия статьи на английский язык, название статьи в транслитерированном варианте в квадратных скобках, название источника (транслитерация, курсив), выходные данные с обозначениями на английском языке.

Ниже приводим примеры библиографических описаний русскоязычных публикаций:

Описание статьи из журналов:

Zagurenko A. G., Korotovskikh V. A., Kolesnikov A. A., Timonov A. V., Kardymon D. V. Techno-economic Optimization of the Design of Hydraulic Fracturing [Tekhniko-ekonomicheskaya optimizatsiya dizaina gidrorazryva plasta]. *Neftyanoe khozyaistvo [Oil Industry]*. 2008. № 11. P. 54–57.

Dyachenko V. D., Krivokolysko S. G., Nesterov V. N., Litvinov V. P. Techno-economic Optimization of the Design of Hydraulic Fracturing [Tekhniko-ekonomicheskaya optimizatsiya dizaina gidrorazryva plasta]. *Khim. Geterotsikl. Soedin. 1996*. Vol. 12. № 9. P. 1243.

Yefremenkova V. M., Startseva O. B., Chumakova N. F. Quality Criteria of Bibliographic Databases [Kriterii kachestva bibliograficheskikh baz dannykh]. *Nauchno-Tech. Inf., Ser. 2*. 2009. № 2. P. 25–29.

Описание статьи из электронного журнала:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B. P. Browsers or Buyers in Cyberspace? An Investigation of Electronic Factors Influencing Electronic Exchange. *J. of Computer-Mediated Communication*. 1999. Vol. 5. № 2. Available at: www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/

Описание материалов конференций:

Usmanov T. S., Gusmanov A. A., Mullagalin I. Z., Muhametshina R. Ju., Chervyakova A. N., Sveshnikov A. V. Features of the Design of Field Development with the Use of Hydraulic Fracturing [Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi*" [Proc. 6th Int. Technol. Symp. "New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact"]. Moscow, 2007. P. 267–272.

Главное в описаниях конференций – ее название на языке оригинала (в транслитерации, если нет английского названия), выделенное курсивом. В скобках дается перевод названия на английский язык. Выходные данные (место проведения конференции, место издания, страницы) должны быть представлены на английском языке.

Описание книги (монографии, сборника):

Nenashev M. F. *Poslednee pravitel'stvo SSSR* [Last Government of the USSR]. Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.

From Disaster to Rebirth: the Causes and Consequences of the Destruction of the Soviet Union [*Ot katastrofy k vozrozhdeniju: prichiny i posledstvija razrushenija SSSR*]. Moscow, HSE Publ., 1999. 381 p.

Kanevskaya R. D. *Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov* [Mathematical Modeling of Hydrodynamic Processes of Hydrocarbon Deposit Development]. Izhevsk, 2002. 140 p.

Описание интернет-ресурсов:

APA Style (2011). Available at: http://www.apastyle.org/apa-style-help.aspx (accessed 5 February 2011).

Pravila Tsitirovaniya Istochnikov [Rules for the Citing of Sources]. Available at: http://www.scribd.com/doc/1034528/ (accessed 7 February 2011).

Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov V. I. *Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor. Diss. dokt. fiz.-mat. nau*k [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

Grigor'ev Iu. A. *Razrabotka nauchnykh osnov proektirovaniia arkhitektury raspredelennykh sistem obrabotki dannykh. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Development of scientific bases of architectural design of distributed data processing systems. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1996. 243 p.

Описание патента:

Palkin M. V., e. a. *Sposob orientirovaniia po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoi golovkoi samonavedeniia* [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF, no. 2280590, 2006.

Правила транслитерации

На сайте http://www.translit.ru/ можно бесплатно воспользоваться программой транслитерации русского текста в латиницу. Для этого, выбрав вариант системы **Board of Geographic Names (BGN)**, мы получаем изображение всех буквенных соответствий.

Система Board of Geographic Names (BGN)

Буква	Транслит
А	A
Б	B
В	V
Г	G
Д	D
Е	E, YE
Ё	E, YE
Ж	ZH
З	Z
И	I
й	Y
К	K
Л	L
М	M
Н	N
О	O
П	P
Р	R
С	S
Т	T
У	U
Ф	F
Х	KH
Ц	TS
Ч	CH

Ш	SH
Щ	SHCH
Ъ	«
Ы	Y
Ь	'
Э	E
Ю	YU
Я	YA

Примечания даются в виде концевых сносок. Архивные и другие источники выделяются перед списком литературы в Источники, нумерация сохраняется сквозная.

В тексте статьи ссылка дается в квадратных скобках, через точку с запятой – цитируемая страница, если это необходимо.

Таблицы – каждая печатается на отдельной странице, нумеруется соответственно первому упоминанию ее в тексте и снабжается заголовком. Таблицы предоставляются в текстовом редакторе Microsoft Word (формат .doc). **Иллюстрации** (рисунки, фотографии, схемы, диаграммы) нумеруются, снабжаются подписями и предоставляются в виде отдельных файлов. В бумажной версии на обороте каждой иллюстрации ставится номер и пометка «верх», «низ». В тексте статьи указывается место таблицы или рисунка. Таблиц и иллюстраций не должно быть более **5**.

Правила предоставления иллюстраций.

Растровые форматы: рисунки и фотографии, должны иметь разрешение не менее 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, градации серого.

Векторные форматы: рисунки должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран шрифтом Times New Roman или Arial.

Правила предоставления диаграмм и графиков.

Графики и диаграммы должны быть созданы табличном процессоре Exel и присылаться вместе с исходными численными данными в одном файле с расширением xls. При создании графиков использовать черный, белый цвета и градации серого, избегать применения трехмерной графики, градиентных заливок и т. д. Все надписи и числа на графиках желательно делать, используя «жирный» шрифт ArialCyr, размер 14. На самом графике не должно быть названия, оно должно быть отражено в подрисуночной подписи. В виде растрового изображения могут быть представлены графики, полученные с помощью специальных программ статистической обработки.

Требования к математическим формулам

Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation (присутствует в составе Word) или символьным шрифтом (надстрочные и подстрочные символы, меню «Вставка», «Символ»).

Вставки формул в виде картинок любого формата не принимаются.

Статьи, поступившие в редакцию, подлежат обязательному рецензированию. Если у рецензентов возникают замечания, статья возвращается на доработку. Редакция оставляет за собой право внесения в текст редакторских изменений, не искажающих смысла статьи.

Правила оформления также см. на сайте журнала: uchzap.petrsu.ru.

Статьи на английском языке должны иметь письменное заключение из Центра языковой подготовки ПетрГУ.

Материалы, не соответствующие предъявленным требованиям, редакция не рассматривает. Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала.

December, № 8. Vol. 2 2012

CONTENTS

BIOLOGY

Kishchenko I. T., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Potapova M. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
SEASONAL GROWTH OF SHOOTS IN SOME BETULA (BETULACEAE) SPECIES
Summary: A research was conducted in the mid-taiga subzone (southern Karelia). Six types of plants belonging to Betula species were surveyed. The study revealed that growth patterns of shoots and leaves depend on biological properties of the species.
Key words: Genus Betula, growth, shoots, introduction 7

Ryzhkov L. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
FISH INDUSTRY IN KARELIAN REPUBLIC (RUSSIA)
Summary: Information about the state and main possible ways of fishery development in the Republic of Karelia (Russia) is presented. It includes information about fisheries, aquaculture status, and reproduction of fish stock.
Key words: Fish facilities, aquaculture, fish farming, reproduction, fish harvesting, lake-river system, water environment, marine and fresh-water fishery, fish cultivation 11

Dzyubuk I. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
FISH PART OF AQUATIC COMMUNITY IN TROUT FARM AREA
Summary: Research results on fish from Lahti Bay of Lake Onega are presented. Changes in species composition in the area adjacent to the cage trout farm are revealed. Analysis of the ruff's morphophysiological parameters (age, weight, length, fatness, indexes of internal organs) was carried out. High indexes of weight, size, and fatness revealed in ruff testify of favorable conditions created by the nearby opetating trout farm.
Key words: Fish, species composition, cage trout farm, ruff, morphophysiological parameters, Lake Onego 14

Zavodovskiy P. G., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
FIRST DATA ON APHYLLOFOROID FUNGI IN FOREST ECOSYSTEM OF SHOTOZERO
Summary: Data about 39 species of aphylloforoid fungi found on the territory of Shotozero are provided.
Key words: Aphylloforoid fungi, forest ecosystems, Shotozerje 18

MEDICAL SCIENCE

Zaripova Yu. R., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Meigal A. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
CLINICAL AND ELECTROMYOGRAPHIC CHARACTERISTICS OF NEUROMUSCULAR STATUS IN PRETERM CHILDREN
Summary: Clinical and electromyographic criteria were used to characterize neuromuscular status of the preterm children within first 6 weeks of their life. Clinical examination revealed improvement of their neurological status during that time. It was found that in the preterm children interference electromyogram (iEMG) in the first 6 postnatal weeks is highly similar by EMG parameters with the term children right after birth. Namely, it is characterized by "simplified" temporal structure, low amplitude, and frequency, and by retarded dynamics of EMG parameters.
Key words: Preterm children, neuromuscular status, electromyography, nonlinear and linear parameters 20

Melentyeva A. A., Republican hospital named after V. A. Baranov (Petrozavodsk, Russian Federation)
Barysheva O. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Kheyfets L. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Zuev A. V., Republican hospital named after V. A. Baranov (Petrozavodsk, Russian Federation)
Strategopulo V. A., Republican hospital named after V. A. Baranov (Petrozavodsk, Russian Federation)
MINERAL AND BONE DISORDER IN CHRONIC KIDNEY DISEASE
Summary: Chronic kidney disease (CKD) is a worldwide condition. Every tenth person inhabiting the Earth has CKD signs. Mineral and bone disorders are the most characteristic and meaningful manifestations of CKD. Such conditions are observed in almost every CKD patient and have difficult multifactor pathogenesis, which in turn gravelly worsens the following prognosis and requires implementation of special approach in conservative therapy and timely surgical treatment.
Key words: Chronic kidney disease, chronic renal failure, mineral and bone disorder, secondary hyperparathyroidism, fibroblast growth factor 23, co-receptor Klotho 25

AGRICULTURAL SCIENCE

Evstratova L. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Nikolaeva E. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Bogoslovsky S. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
INFLUENCE OF NARROW-LEAVED BLUE LUPIN BIOMASS ON POTATO YIELD IN NATURAL HABITAT OF GLOBODERA ROSTOCHIENSIS WOLL IN CONDITIONS OF KARELIA
Summary: Efficiency of using narrow-leaved blue lupin as a forecrop and green manure crop for the increase of potato yield and decrease of infectious pressure caused by *G. rostochiensis* in the soil is shown.
Key words: Potato, narrow-leaved blue lupin, potato cyst nematode 30

Shterkel S. G., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Bolgov A. E., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
EFFECTIVENESS OF PRODUCTION, SELECTION, AND ECONOMIC ACTIVITIES OF AYRSHIRE CATTLE BREEDING FARMS IN KARELIA
Summary: Production, selection, and economic indicators of Karelian cattle breeding farms "Breeding farm "Il'inskoe" and "Breeding factory "Megrega" were studied. The farms have high productive herds with the yield of 7300–7500 kg of milk per cow per year. The sale of young breeders amounts to 65–102 heads per year. The profitability level of dairy cattle is around 7–20,3 %. These breeding factories proved to be highly productive enterprises in Karelia. These companies should elevate the level of fat and protein in cow milk and reduce production costs. They also need to ensure efficient production and growth of competitive young bulls of Ayrshire breed.
Key words: Dairy cattle, Ayrshire breed, milk production, selection, reproduction, bulls-producing group 32

Tzarev A. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Laur N. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Tzarev V. A., Voronezh State Forest Engineering Academy (Voronezh, Russian Federation)
ECONOMIC EFFICIENCY OF FOREST TREE BREEDING
Summary: Results of the seminal progeny test carried out on Scotch pine plus trees and aspen hybrids are considered. The use of the aspen hybrid material was instrumental in receiving plantations that exceeded actual reserves by 2–3 times. The best types of hybrids demonstrated record stocks of healthy steam wood (267–508 m^3/ha at the age of 29 years).
Key words: Forest tree breading, economic efficiency, plus trees, Scotch pine, aspen hybrids. 35

ENGINEERING SCIENCE

Malinov G. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Kondrashov V. F., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Gavrilov T. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
DETERMINATION OF BLADE SLIDING ANGLE IN PROCESS OF REFERENCE CUTTING
Summary: Friction angles of fodders of animal origin against metal sheets are determined. The analysis of conditions facilitative in animal fodders' size reduction and increase of energy efficiency are studied. Mathematical values of friction angles for determined conditions and used fodders are obtained.
Key words: Reference cutting, slip angle, friction angle, animal origin feeds. 40

Savin I. K., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Zavarkina E. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
DEVELOPMENT OF COOLING SYSTEMS BASED ON NATURAL COLD WITH ELECTRO HYDRODYNAMIC EVAPORATION AND CONDENSATION CYCLE
Summary: A possibility of using natural cold in ecologically sound and energy efficient cooling systems is considered. A technical solution allowing maintenance of the required regime is provided.
Key words: "Natural" cold, electro and hydrodynamic system, evaporation condensation system. 43

Rodionov A. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Tsypouk A. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Markov O. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Egipti A. E., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
DIRECTIONS OF DYNAMIC HOLEMAKER IMPROVEMENT
Summary: Prospective directions in construction improvement of the dynamic holemaker type L-2U used for forest planting are presented in the article.
Keywords: Dynamic holemaker, improvement, forest planting 46

Sukhanov Yu. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Seliverstov A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Sokolov A. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Syunev V. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
SIMULATION MODELING OF HARVESTER'S WORK: ALGORITHM AND REALIZATION
Summary: A short descriptions of the algorithm and a simulation modeling of the harvester's work are presented in the article.
Key words: Cut-to-length logging, harvester, simulation model 49

Shabaev A. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Kuznetsov V. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Spirichev M. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Kositsyn D. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
APPROACHES TO ALGORITHM AND SOFTWARE COMPLEX DEVELOPMENT AIMED AT OPTIMAL PLANNING OF END-TO-END WOOD UTILIZATION PROCESSES
Summary: New approaches aimed at the new software system development are presented. The system of optimal planning (SSOP) "Wood processing" targets improvement of wood utilization processes from forests to end products.
Key words: Enterprise management, forestry sector, optimization methods, operations' research 52

Babkin V. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
TEMPERATURE DEPENDENCE OF COEFFICIENTS OF WALL ANISOTROPIC TURBULENCE MODEL FOR WATER AND AIR

Summary: Comparing solutions of velocity profiles and heat exchange problems in turbulent flows of water and air in pipes and plane channels, obtained in the framework of the wall anisotropic turbulence model with well-known empirical formulae, the temperature correlations have been received. Obtained correlations were derived for coefficients determining turbulent viscosity and turbulent heat conductivity in the model for water and air.
Key words: Wall anisotropic turbulence model, turbulent viscosity, turbulent heat conductivity, temperature correlations for water and air 57

Belyaev S. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Davydkov G. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Persky S. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
SECOND GENERATION BIOFUEL – EUROPEAN EXPERIENCE
Summary: Short and long term prospects of biofuel production from biomass and other sources have been evaluated. Special attention is paid to their ecological characteristics. Biofuels of second generation have a potential to substitute significant amounts of oil while using relatively cheap biomass resources. They will also help in the decrease of the greenhouse gas generation.
Key words: Biofuel, second generation biofuel, Fischer – Tropsch technology 61

Devyatnikova L. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Emelianova E. G., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
WAYS TO IMPROVE EFFECTIVENESS OF WOOD RESOURCES' USAGE AT PULP AND PAPER MILLS
Summary: A problem of the cost-effective use of wood resources at a pulp and paper mill is raised. Ways to reduce cost due to the use of short length logs in processed balance are provided. Two steps of the most widespread technology of wood processing, debarking, and chip making from shot length logs are highlighted. Ways to decrease losses of wood by optimization of raw materials' preparation process for chipper are offered.
Key words: Resource-saving, length of logs, re-sawing, chip, chip quality. 65

Nikonova Yu. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Rakovskaya M. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Roi K. D., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
CROSS SECTION RIGIDITY OF ROUND TIMBER: EXPERIMENT AND NUMERICAL MODELING
Summary: Materials of previously performed studies regarding definition of the contact forces of balance interaction in a debarking drum are presented. The balance is understood as a section of a tree trunk of standard length (1,2 m). The balance is used as a feedstock in the production of wood chips. The main attention is paid to the rigidity of the balance.
Key words: Balances, rigidity, mathematical model, forces of contact interaction, debarking drum 69

Seliutina L. F., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
ENERGY EFFICIENT BUILDING STRUCTURES IN HOUSE-BUILDING OF KARELIA
Summary: The article contains information about energy efficient wooden structures, outer gas-concrete blocks, three-layered brick walls with the middle layer of polystyrene concrete, and walls from reinforced concrete panels. A review of contemporary energy efficient enclosing structures built in Karelia for the past five years is provided.
Key words: Energy efficiency, wooden frame house building, three-layer brickwork, reinforced concrete panels 73

Fotina E. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Marakhtanov A. G., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Nasadkina O. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
INFORMATION SUPPORT AIMED AT IMPROVEMENT OF PETRSU AUTHORS' SCIENTIFIC CITATION INDEXES
Summary: The article presents citation indexes in force, basic methods applied in this sphere in order to develop information and methodology system for the increase of science citation indexes of PetrSU researchers.
Key words: Citation, citation index, h-index, impact factor. 77

PHYSICS AND MATHEMATICS

Ignakhin V. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Sysun V. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Tikhomirov A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
PROBE DIAGNOSTICS IN RAREFIED PLASMA
Summary: Experimental data of ion current on electric probe in low-pressure rarefied plasma conditions were obtained. A comparison of experimental results with the results of theoretical modeling was done. The data analysis shows that in all cases the experimental result is close to the approximation of radial drift, and the influence of thermal ion velocity on probe current value is absent.
Key words: Plasma, electric probe, diagnostics 82

Kogochev A. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Kurskov S. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Sysun V. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
EXCITATION PROCESSES IN Ar-Ar COLLISIONS
Summary: The present work deals with the study of Ar ($3p^5 4p$) excitation states in binary low-energy Ar-Ar collisions. Results of the experimental investigation of excitation cross sections of Ar I $4p[3/2]_2$, $4p'[3/2]_1$, $4p'[1/2]_1$ and $4p'[3/2]_2$ levels in collision energy range from threshold up to 500 eV (centre of mass system) and degree of polarization for $4s[3/2]_2^0 – 4p[3/2]_2$, and $4s[3/2]_2^0 – 4p'[1/2]_1$ transitions in this energy range are represented.
Key words: Atomic collisions, excitation cross sections, quasimolecule, polarization of emission, mechanism of excitation 86

Sidorov N. V., I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Kola Science Center of RAS (Apatity, Russian Federation)
Fedorova E. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Aleshina L. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Voskresenskii V. M., I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Kola Science Center of RAS (Apatity, Russian Federation)
CLUSTERIZATION OF STRUCTURE UNITS INTO NIOBATE LITHIUM CATION SUBLATTICE
Summary: With the use of combinational scattering spectroscopy and X-Ray methods we have shown that disordering in the cation sublattice of the yttrium-doped lithium niobate crystals takes place due to clusterization along the **c** axis filled with cations of octahedrons**.**
Key words: Niobate lithium, combinational scattering spectroscopy, full-profile analysis of X-ray diffraction patterns, cation clusterization. 90

Gostev V. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Mikhaylov E. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
PLASMA COVERAGE OF CARBON COATINGS
Summary: A possibility of getting carbon polymer coatings from arenes in plasma chemical reactions by the use of cold plasma is studied. Carbon coating were evaporated on different substrates. The obtained experimental data were analyzed.
Key words: Plasma generator, cold plasma, polymer coating, plasma chemical reaction 94

Shtykov A. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Luizova L. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
EVALUATION OF DIFFUSION CONSTANT AS KINETIC PARAMETER OF DUSTY PLASMA STRUCTURES
Summary: This paper is concerned with diffusion processes in dusty plasmas. The video registration method and the correlation spectroscopy method are described and their applicability is tested. These methods are applied for diffusion constant value calculation. A good agreement between values of diffusion constants calculated by the video registration method and the correlation spectroscopy method are shown.
Key words: Dusty plasma, correlation spectroscopy, diffusion constant, self-organization. 97

Peshkova I. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Santalova D. R., University of Tartu (Tartu, Estonia)
ON APPLICATION OF WEAK REGENERATION IN SIMULATION OF COMPLEX INVENTORY CONTROL SYSTEMS
Summary: A complex inventory control system is represented as a queuing system with the purpose to estimate steady-state characteristics for total average cost. Stochastic processes describing behavior of this system and its regenerative structure are investigated. The weak regeneration approach for the system simulation and estimation of its characteristics is used.
Key words: Weak regeneration, complex inventory control system, waiting time, renewal process, simulation 100

Bezdelnikov V. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
ELASTIC DEFORMATION MODELING BASED ON SURFACE GRID
Summary: A method of modeling three-dimensional object deformation is described. This problem originated from the eye microsurgery operation framework development and thus has some advantages that can help in physical simulation. We suggest an approach that can reduce real-time deformation calculation complexity. The standard way of elastic objects' modeling with a three-dimensional tetrahedron grid does not allow achievement of the goal. Instead of using a three-dimensional grid we simulated the surface reaction by taking into account the internal volume forces' measure.
Key words: Eye surgery simulation, small elastic deformations, elasticity, plasticity, inner pressure approximation 104

Valova A. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
SEARCH OF LINEAR RECURRENCE CORRELATION WITH CONSTANT INTEGER COEFFICIENTS IN PRE-SET SEQUENCE BY MEANS OF EUCLUDEAN ALGORIGHM
Summary: Recurrences with properties mentioned in the title are common for physical problems which can be traced to the problems of enumerative combinatorics and then solved with the help of the transfer matrix method. We suggested a modification of Euclidean algorithm, which uses modular arithmetic to solve the problem.
Key words: Linear recurrence, Euclidean algorithm, Modular arithmetic 106

Voropaev A. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
FORMULAE DERIVATION FOR NUMBERS OF FIXED LENGTH CYCLES IN ROOK'S GRAPHS
Summary: A technique for symbolic evaluation of the explicit formulae for counting fixed length cycles in undirected graphs is presented. Transformations of sums in the formulae are illustrated on the example of rook's graphs associated with an N×N chessboard. By means of the explicit formulae for counting 3, 4, ..., 7-cycles in arbitrary graphs, we derived the numbers of such cycles in rook's graphs as polynomials in N.
Key words: Counting of fixed length cycles in undirected graphs, rook's graphs 109

Karavaev A. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
NUMBER OF PHYSICAL CONNECTIVITY STATES IN TRANSFER MATRIX METHOD FOR ENUMERATION OF HAMILTONIAN CIRCUITS IN RECTANGULAR LATTICE
Summary: We obtained a formula for the exact number of physical connectivity states, which are constructed by the transfer matrix method for the enumeration of Hamiltonian circuits' number in a $P_m \times P_n$ lattice. We prove that the number of physical states is asymptotically square root of *m* times smaller than the Motzkin number. The obtained formulae allowed us to get a better understanding the complexity of the problem.
Key words: Transfer matrix method, Hamiltonian circuits, circuits in a lattice 112

INFO FOR THE AUTHORS 114