

УДК 629.7.025.84

О.А. Хоминич,
Д.М. Зинченко, канд. техн. наук

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ АГРЕГАТОВ МОДЕЛИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЗАМКНУТОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Вступление

Летательный аппарат (ЛА) представляет собой сложный геометрический объект, состоящий из ряда агрегатов сложной формы (крыло, фюзеляж и пр.). Геометрия данных агрегатов состоит из поверхностей различной степени сложности, проектирование и изготовление которых имеет затруднительный характер.

Однако мы живем в эпоху инновационных технологий, и с каждым годом появляется множество современных средств и методов для проектирования и создания авиационной техники, которые делают эти процессы легче. Так, на помощь конструкторам пришли программные комплексы САПР (SolidWorks, CATIA) для автоматизации работ на этапах конструкторской и технологической подготовки производства.

Немаловажным фактором производства была и остается стоимость изготовления агрегатов ЛА [1]. Технологии изготовления деталей, узлов и самолетов в целом определяют во многом ресурс изделия, его трудоемкость и себестоимость, стабильность и культуру производства. Создание новых технологий, способных обеспечить получение деталей, удовлетворяющих высоким техническим требованиям, открывает дорогу для конструктивного совершенствования самолетов. Одна из таких технологий – использование «аддитивного производства» [2].

«Аддитивное производство»

«Аддитивное производство» – процесс создания цельных трехмерных объектов практически любой геометрической сложности на основе цифровой модели. В настоящее время доступен широкий выбор методов «аддитивного производства». Основные различия заключаются в методе нанесения слоев и использовании расходных материалов. Основные методы «аддитивного производства» представлены в табл. 1.

3D-печать, как один из методов «аддитивного производства», основана на концепции построения объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели. Фактически 3D-печать является полной противоположностью таких традиционных методов механического производства и обработки, как фрезеровка или резка, где формирование облика изделия происходит за счет удаления лишнего материала. Хотя технология 3D-печати появилась еще в 80-х

годах прошлого века, широкое коммерческое распространение 3D-принтеры получили только в начале 2010-х [2].

Основным преимуществом данного процесса является возможность создания геометрических форм практически неограниченной сложности.

Таблица 1 – Основные методы «аддитивного производства» [2]

Метод	Технология	Используемые материалы
Экструзионный	Моделирование методом послойного наплавления (FDM или FFF)	Термопластики (такие, как полилактид (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) и др.)
Проволочный	Производство произвольных форм электронно-лучевой плавкой (EBF)	Практически любые металлические сплавы
Порошковый	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Практически любые металлические сплавы
	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Титановые сплавы
	Выборочная лазерная плавка (SLM)	Титановые сплавы, кобальт-хромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий
	Выборочное тепловое спекание (SHS)	Порошковые термопластики
	Выборочное лазерное спекание (SLS)	Термопластики, металлические порошки, керамические порошки
Струйный	Струйная трехмерная печать (3DP)	Гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси
Ламинирование	Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)	Бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка
Полимеризация	Стереолитография (SLA)	Фотополимеры
	Цифровая светодиодная проекция (DLP)	Фотополимеры

Постановка задачи

Для изучения влияния геометрической формы концевых аэродинамических поверхностей (КАП) при сопряжении переднего и заднего крыльев ЛА замкнутой аэродинамической схемы на степень изменения значения индуктивного сопротивления было принято решение провести летные испытания данной модели ЛА.

При создании модели ЛА конструкция крыльев, фюзеляжа и киля была изготовлена традиционным способом, а именно с использованием поперечного (нервюры, шпангоуты) и продольного (лонжероны, стрингера) наборов элементов.

В качестве расходного материала были использованы: фанера, сосна 1-го сорта, бамбуковые палочки, бальза и мелкозернистый пенопласт. При применении данной технологии изготовления и имеющегося материала качество внешней поверхности получилось довольно высоким (внешний облик агрегатов модели ЛА соответствовал заданному облику в SolidWorks).

Однако в конструкции ЛА замкнутой аэродинамической схемы присутствуют агрегаты сложной геометрической формы – КАП (рис. 1). Изготовление данных агрегатов затруднительно, но возможно традиционным способом. В связи с затруднением изготовления данных агрегатов было принято решение использовать технологию 3D-печати.

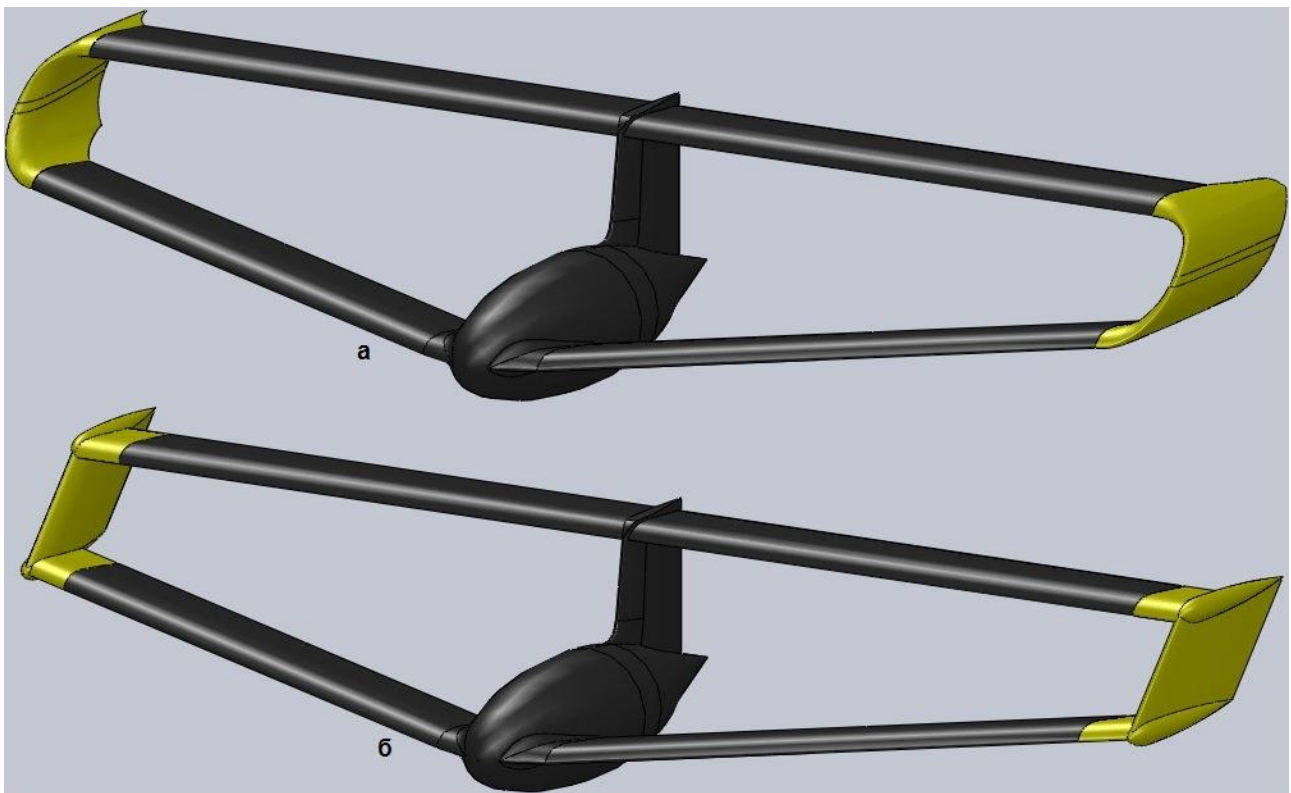


Рисунок 1 – ЛА замкнутой аэродинамической схемы с двумя вариантами КАП, построенными в SolidWorks: а – КАП № 1; б – КАП № 2

Целью представленной работы является уменьшение времени и упрощения построения, а также улучшение качества внешней поверхности сложных агрегатов модели ЛА замкнутой аэродинамической схемы с применением современных инновационных технологий – 3D-печати.

Создание КАП с помощью моделирования методом послойного наплавления (FDM)

В данной работе применение современных инновационных технологий основано на 3D-печати при моделировании методом послойного наплавления (FDM) [2].

Fused Deposition Modeling (FDM) – технология «аддитивного производства», широко используемая при создании трехмерных моделей. Аналогичное название – «Fused Filament Fabrication» («Производство методом наплавления нитей») или FFF. Технология FDM подразумевает создание трехмерных объектов за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели с помощью 3D-принтера (рис. 2).

С помощью данного метода печати были созданы КАП различной степени сложности ЛА замкнутой аэродинамической схемы (рис.1).

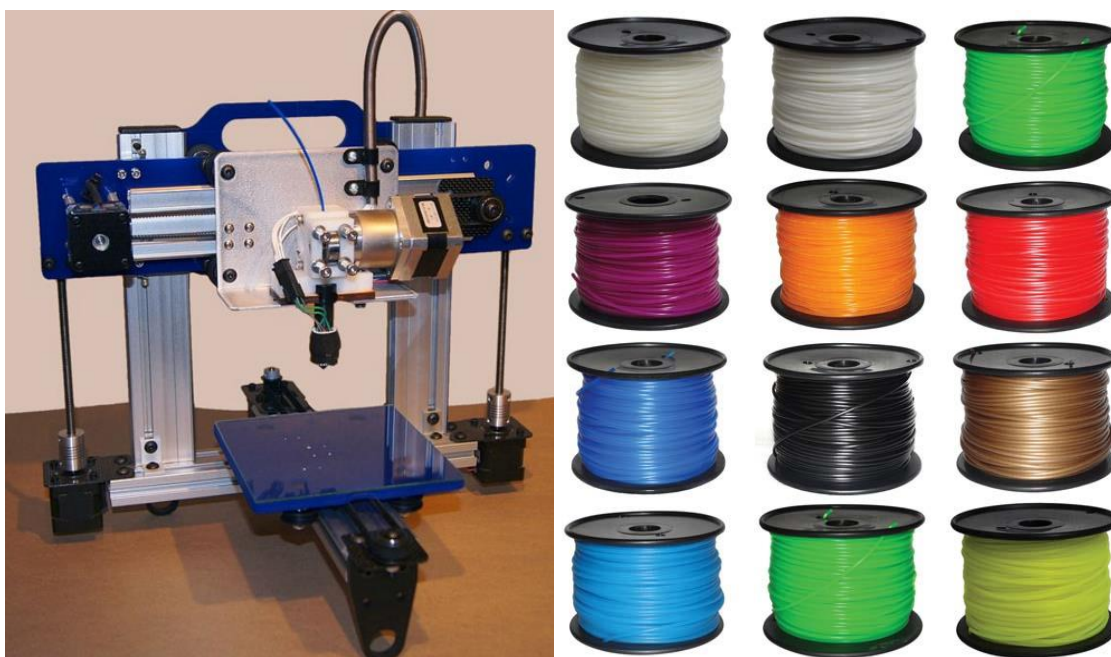


Рисунок 2 – 3D-принтер и катушки ABS-пластика, используемые для моделирования методом послойного наплавления (FDM)

Производственный цикл начался с разработки моделей КАП ЛА замкнутой аэродинамической схемы в SolidWorks. Созданные модели были разбиты на четыре части, как показано на рис. 3. Это было сделано по следующим причинам:

- габариты моделей КАП превышали допустимую область печати;

- для ориентирования модели наиболее подходящим образом для печати (нужно чтобы она имела со столом общую плоскость);
- во избежание расслоения расходного материала (модель в процессе печати делится на слои, которые могут со временем расслаиваться);
- для увеличения прочности путем склеивания частей модели (клей увеличивает прочность);
- во избежание отклонения детали от вертикали.

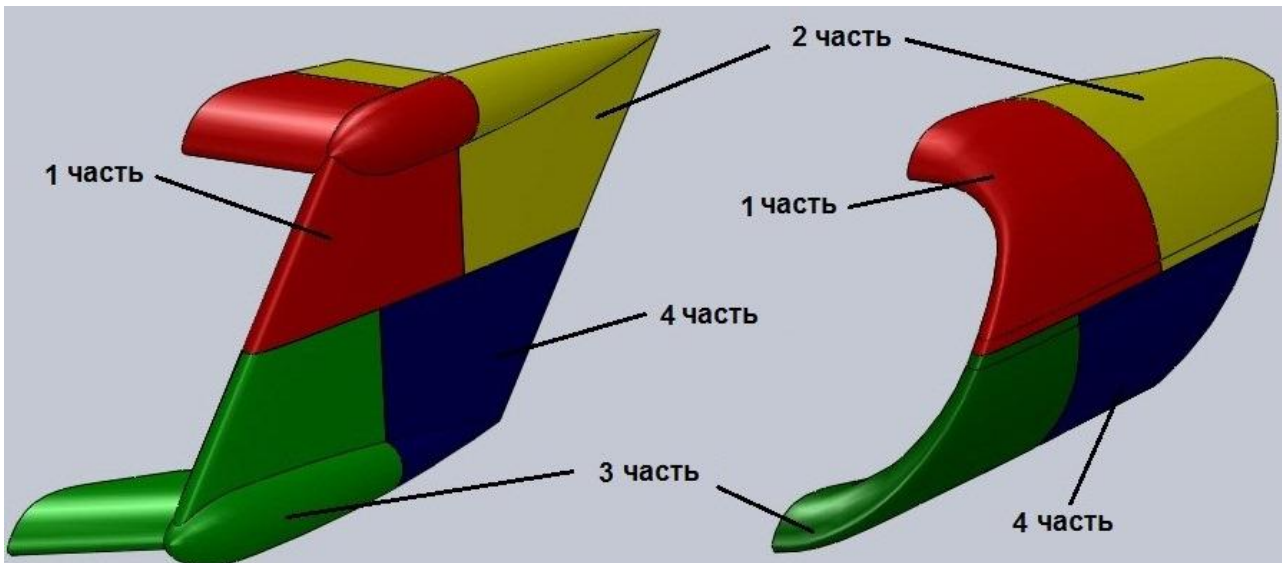


Рисунок 3 – Варианты КАП ЛА замкнутой аэродинамической схемы в SolidWorks, разделенные для выполнения 3D-печати

Модели в формате *.stl были разделены на слои и ориентированы наиболее подходящим образом для печати, как показано на рис. 4.

Технология 3D-печати. Изделие производится выдавливанием (экструзией) и нанесением микрокапель расплавленного термопластика с формированием последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования [2].

Пластиковая нить разматывается с катушки и подается в экструдер – устройство, оснащенное механическим приводом для подачи нити, нагревательным элементом для плавки материала и соплом, через которое осуществляется непосредственно экструзия. Нагревательный элемент служит для нагревания сопла, которое в свою очередь плавит пластиковую нить и подает расплавленный материал на строящуюся модель. Как правило, верхняя часть сопла, наоборот, охлаждается с помощью вентилятора для создания резкого градиента температур, необходимого для обеспечения плавной подачи материала.

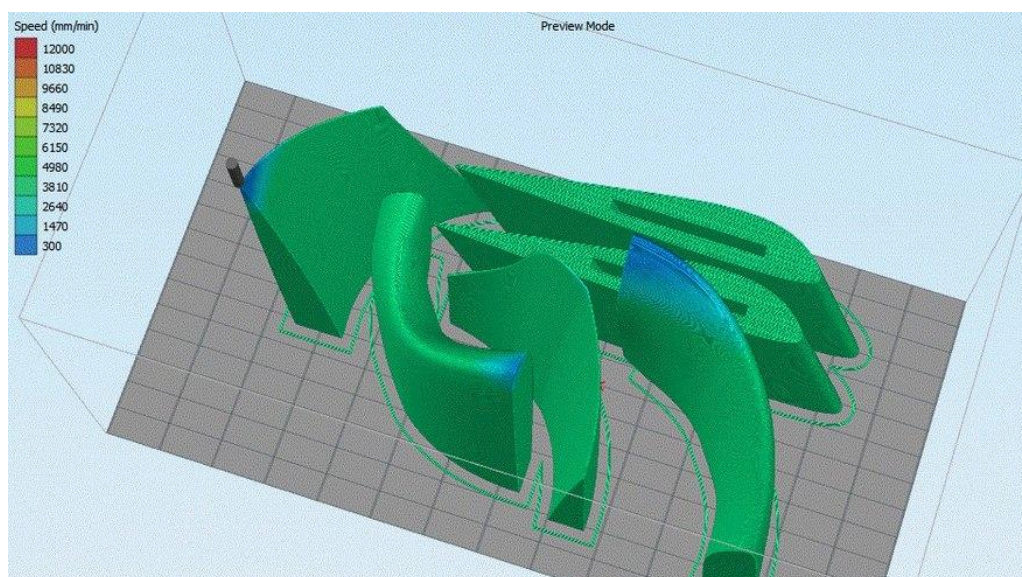


Рисунок 4 – Разделенная модель КАП № 1, ориентированная наиболее подходящим образом для печати

Экструдер перемещается в горизонтальной и вертикальной плоскостях под контролем алгоритмов, аналогичных используемым в станках с числовым программным управлением. Сопло перемещается по траектории, заданной системой автоматизированного проектирования. Модель строится слой за слоем, снизу вверх. Причем скорость печати уменьшается.

Толщина слоя печати составляет 100 мкм (250 DPI – количество точек на дюйм).

В качестве расходного материала выбран ABS-пластик (см. рис. 1).

ABS-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол) – ударопрочный материал, относящийся к инженерным пластикам. Химическая формула – $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$. Выдерживает кратковременный нагрев до 90...100 °С. Максимальная температура длительной эксплуатации: 75...80 °С [2]. Структурная формула ABS-пластика показана на рис. 5.

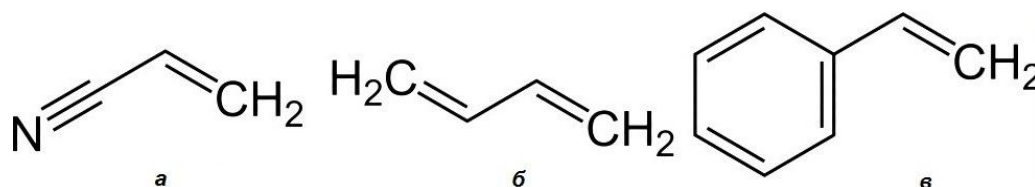


Рисунок 5 – Химические формулы мономеров, из которых производится ABS-пластик: а – акрилонитрил; б – бутадиен 1,3; в – стирол

Сравнительный анализ физико-механических свойств ABS-пластика и материалов, которые применяются в легком авиастроении, приведены в табл. 2 согласно [2–7].

Таблица 2 – Физико-механические свойства материалов

Наименование параметра	Наименование материала			
	ABS-пластик [2]	Фанера (ФСФ) [6,7]	Бамбук [3,5]	Сосна [4,5]
Средняя плотность $\rho_{ср}$, г/см ³	1,06	0,7	0,4	0,52
Прочность* при растяжении $\sigma_{рmax}$, МПа	35-50	40-45	79	100-116
Прочность* при сжатии $\sigma_{сжmax}$, МПа	46-80	61-69	52	40-49
Прочность при изгибе $\sigma_{изгmax}$, МПа	50-87	81-110	112	70-92
Модуль Юнга E , МПа	1700-3000	7000-9000	9000	8800

* – вдоль волокон.

Как видно из табл. 2, ABS-пластик не уступает по прочности таким материалам, как сосна, бамбук и фанера, что подтверждает целесообразность применения данного вида материала при создании легкой авиационной техники. Плотность ABS-пластика превышает значение авиационных материалов. Однако технология 3D-печати позволяет создавать детали с различным заполнением материала, что в свою очередь уменьшает массу изделия при достаточной прочности.

В данной работе части КАП ЛА замкнутой аэродинамической схемы (рис. 6) были напечатаны с 5%-ным заполнением ABS-пластика, причем наружная толщина агрегатов составила 1,5 мм (100 % заполнения). Внутреннее заполнение представляло собой сотовую конструкцию квадратного сечения. Время печати одной КАП составило около $t_{печ} = 6$ часов. Полученные части КАП были склеены с помощью полиуретанового клея. Значения массы КАП $m_{КАП}$ при различном заполнении моделей ABS-пластиком представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Значения массы КАП при различном заполнении моделей ABS-пластиком

	Масса КАП $m_{КАП}$, г	
	КАП № 1 (пара)	КАП № 2 (пара)
Заполнение 100 %	1219	1498
Заполнение 5 %	121	140



а



б

Рисунок 6 – Модели КАП № 1 (а) и КАП № 2 (б), реализованные с помощью технологии FDM

Выводы

В представленной работе проанализированы методы и показана целесообразность применения «аддитивного производства» при создании геометрически сложных агрегатов модели ЛА замкнутой аэродинамической схемы. Построение модели с использованием современных технологий занимает от нескольких часов до нескольких дней в зависимости от используемого метода, а также размера и сложности модели.

Применение 3D-печати на основании технологии FDM дало возможность создать геометрические формы практически неограниченной сложности, такие, как КАП ЛА замкнутой аэродинамической схемы, за очень короткий промежуток времени. Так, время печати одной КАП составило около $t_{печ} = 6$ часов. При этом качество внешней поверхности получилось довольно высоким.

Возможность создания КАП ЛА с различным заполнением материала позволила минимизировать их массу при обеспечении достаточной прочности. Так 5%-ное заполнение частей КАП уменьшило массу изделия в 10 раз. Это стало возможным при использовании сотовой конструкции.

Расходный материал – АБС-пластик является прочным материалом, не уступающим по прочности авиационным легким материалам. Данное обстоятельство подтверждает целесообразность применения данного вида материала при создании легкой авиационной техники.

В работе показано применение 3D-печати при мелкосерийном производстве в домашних условиях с применением экструзионного метода. С учетом разнообразности методов и преимуществ «аддитивного производства» возможно создание агрегатов ЛА в промышленных масштабах на производстве (например, создание моделей ЛА для продувки в аэродинамических трубах). Промышленные аддитивные системы могут, как правило, сократить время до нескольких часов, но все зависит от типа установки, а также размера и количества одновременно изготавливаемых моделей.

Традиционные производственные методы, например литье под давлением, могут обходиться дешевле при производстве крупных партий полимерных изделий, но аддитивные технологии обладают преимуществами при мелкосерийном производстве, что позволяет достигнуть более высокого темпа производства и гибкости дизайна, наряду с повышенной экономичностью в пересчете на единицу произведенного товара. Однако в данный момент на главном авиационном предприятии Украины – ГП «АНТОНОВ» технология 3D-печати в производстве не используется.

Список использованных источников

1. Григорьев, В. П. Технология самолетостроения [Текст] / В. П. Григорьев. – М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1960. – 537 с.
2. 3D-принтеры сегодня [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology/ – 17.01.2016 г.
3. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К.: Наук. думка, 1988. – 736 с.
4. Справочник по древесине [Текст] / Центр. науч.-исслед. ин-т мех. обработки древесины; под. ред. д-ра техн. наук Б. Н. Уголева. – М.: Лесн. промышленность, 1989. – 296 с.
5. Древесные породы мира [Текст] : пер. с англ. / под. ред. д-ра экон. наук Г. И. Воробьева. – М.: Лесн. промышленность, 1982. – Т. 2. – 352 с.
6. ГОСТ 3916.1-96. Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона лиственных пород [Текст]. Взамен ГОСТ 3916.1-89, ГОСТ 10.55-71; введ. 1998–27–03. – Мн.: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Изд-во стандартов, сор. 1998. — 19 с.
7. Справочник фанерщика [Текст] / Центр. науч.-исслед. ин-т фанеры и мебели.: – М.: Гослесбумиздат, 1959. – Т. 2. – 331 с.

Поступила в редакцию 16.02.2016.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Сухов,
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», г. Киев.*