

УДК 662.6

СОВМЕСТНОЕ СЖИГАНИЕ УГЛЯ И БИОМАССЫ В ФАКЕЛЬНЫХ КОТЛОАГРЕГАТАХ

Щудло Т.С., Дунаевская Н.И., Бесценный И.В., Бондзик Д.Л.

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины

Непрерывно развивающаяся мировая экономика ставит перед человечеством все новые энергетические задачи, в связи с этим, потребление первичных энергоресурсов непрерывно растет, что заставляет ряд стран, в особенности стран-импортеров энергетического топлива, использовать альтернативные источники энергии.

Одновременно, на протяжении последних 20 лет, пристальное внимание мировой общественности обращено к вопросам экологии. Выполнение решений экологических конвенций существенно ограничивает использование ископаемых и стимулирует спрос на альтернативные возобновляемые топлива.

На (рис. 1) показана структура производства первичной энергии и возобновляемой энергии в мире состоянием на 2008 год [1]. Как видно, потребность человечества в энергии на 12,8% покрывается за счет возобновляемых источников, из которых 71,7% – за счет твердой биомассы. К последней относят все виды сухих или высушенных растений, в том числе древесину, древесные гранулы и брикеты, стружку, стебельчатую массу (солому и гранулы из соломы), шелуху различных растительных зерен и т.п.

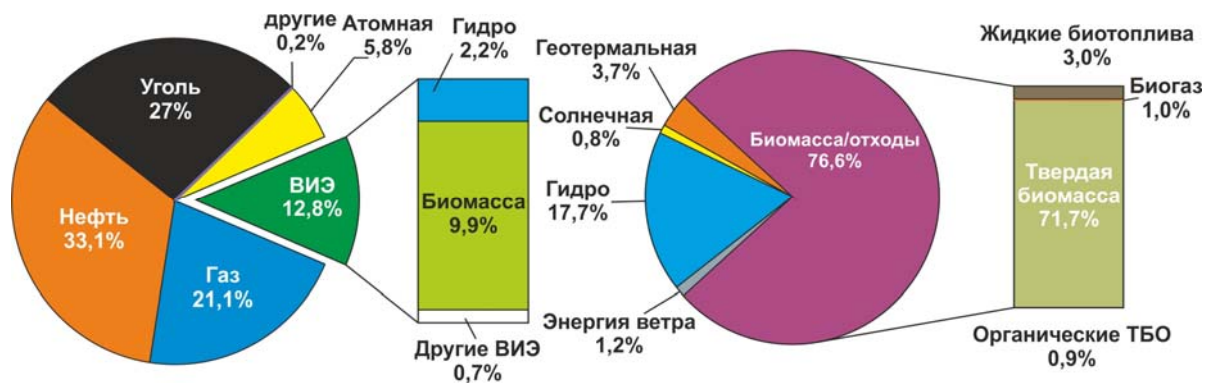


Рис. 1. структура производства первичной энергии и возобновляемой энергии в мире состоянием на 2008 год

Среди разновидностей энергетического использования твердой биомассы широкое распространение получила технология совместного сжигания биомассы с углем (ССБУ). Согласно принятой в [2] классификации, технологию ССБУ можно подразделить на:

- сжигание в слое (неподвижные и подвижные решетки, топки с колосниковой решеткой и т.д.);
- сжигание в псевдооживленном слое в разнообразных модификациях;
- совместное факельное сжигание биомассы с углем.

Основным преимуществом совместного сжигания является использование уже существующего котельного оборудования, сжигающего уголь, что обеспечивает наименьшие капитальные затраты в сравнении со строительством новых котлоагрегатов. Технология также обеспечивает гибкость с использованием топлива, позволяет утилизировать значительное количество биомассы, частично заместить ископаемое топливо возобновляемым (обычно до 20% по массе) CO₂-нейтральным топливом, а также снизить выбросы топливных оксидов азота и оксидов серы (содержание серы и азота в твердой биомассе в среднем в 10 раз ниже чем в угле). К недостаткам технологии можно отнести низкую плотность и калорийность твердой биомассы, а иногда и высокую влажность.

Среди приведенных выше разновидностей технологии ССБУ, наибольшее распространение получило факельное сжигание. Это объясняется высокой эффективностью сжигания вследствие максимальной теплонапряженности топочного объема пылеугольных котлоагрегатов, а так же их повсеместной распространенностью. Так, по данным сайта <http://www.ieabcc.nl>, сегодня в мире насчитывается 245 котлоагрегатов, совместно сжигающих угли с биомассой, из них пылеугольных – 105. Наибольшее распространение технология совместного факельного сжигания получила в США, Великобритании, Финляндии (29, 19 и 10 котлоагрегатов соответственно).

В последние годы, в Институте угольных энерготехнологий Национальной академии наук Украины проводятся исследования совместного факельного сжигания биомассы и угля украинских месторождений. Основное внимание уделяется возможности внедрения технологии на существующих антрацитовых блоках, поскольку предполагается, что добавление высокорекреационной биомассы позволит компенсировать низкий выход летучих в антраците и тем самым улучшить его воспламеняемость и полноту выгорания в случаях поставок непроектного угля или неудовлетворительного состояния котлоагрегата. В экспериментах в качестве биомассы использовалась древесина (сосна), как одна из наиболее распространенных и доступных в Украине. Рис. 2 содержит информацию о техническом потенциале отходов сельского хозяйства и деревообработки в Украине [3].



Рис 2. Технический потенциал отходов сельского хозяйства и деревообработки в Украине (2008 год)

Как видно, древесная биомасса в основном преобладает в северных и западных областях, в то время как солома в центральных.

Целью первого этапа исследований было найти оптимальные соотношения совместно сжигаемых топлив, обеспечивающее наиболее полное выгорание, а также возможность использования древесины как поддерживающего топлива аналогично газовой подсветке. Эксперименты проводились на пилотном стенде ВГП-100В мощность 100 кВт [4] (рис. 3), который включает вертикальный реактор с нисходящим потоком 1, горелочное устройство 2, шлакоборник 3, поворотный участок с циклоном 4, камеру охлаждения и дожигания 5. Общая длина реактора 4,8 м, длина диагностического участка от выходного сечения горелочного устройства 2,4 м.

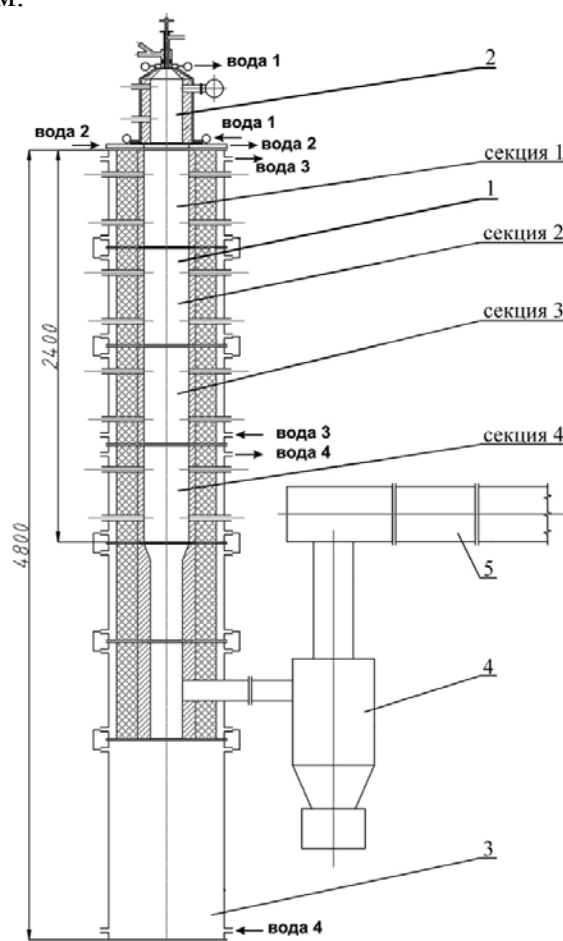


Рис. 3. Экспериментальная установка ВГП-100В

Диагностический участок состоит из 4 секций длиной по 0,6 м каждый, внутренний диаметр 0,28 м (диаметр канала после сужения – 0,2 м). Водоохлаждаемые стенки реактора покрыты изнутри трехслойной футеровкой: огневой слой (диоксид циркония), теплоизолирующий (шамот), термокомпенсационный (асбестовая ткань). В установку предусмотрена подача природного газа (в основную и вспомогательную горелки), воздух (в основную и вспомогательную горелки, транспортирующий воздух с углем и древесиной, вторичный воздух), уголь (в верхнюю часть горелочного устройства через боковую стенку), опилки (в основную горелку).

В качестве исследуемого угля были применены образцы пыли стандартного стационарного помола. Технический анализ исследуемых пылевидного антрацита и древесины приведен в табл. 1.

Таблица 1. Результаты теханализа исследуемых пылевидного антрацита и тырсы

	антрацит		древесина
	№ образца		
	1	2	
$W^r, \%$	1,1	0,6	10,0
$A^d, \%$	24,8	27,9	1,8
$V^d, \%$	5,5	5,3	83,5
$V^{daf}, \%$	7,3	7,3	85,0

Характеристика режимов отдельных экспериментов по сжиганию угля с природным газом, а также по совместному сжиганию угля с тырсой в режиме полного замещения «подсветочного» газа приведены в (табл.2).

Таблица 2. Характеристика экспериментальных режимов исследования ССБУ на установке ВГП-100В

режимы	расходы				зольность угля, % сух.	степень конверсии тырсы, %	степень конверсии угля, %	общий избыток воздуха	температура газов, °С				результаты газового анализа			доля по теплу %				суммарная тепловая мощность, кВт	суммарные тепловые потери, кВт	время пребывания, с
	газ, м ³ /ч	уголь, кг/ч	тырса, кг/ч	воздух, м ³ /ч					секция 1	секция 2	секция 3	секция 4	%		ppm	газ	газ/тырса*	уголь	тырса			
													CO ₂	O ₂								
Подсветка угля природным газом																						
1	1,8	18,7	0,0	102,6	24,8	0	63,4	0,74	1340	1340	1330	1200	16,3	1,8	200	11,3	6,9	88,7	0	146,6	11,7	0,9
2	1,8	18,7	0,0	102,6	27,9	0	60,8	0,76	1300	1350	1355	1250	15,3	2,2	200	11,7	7,2	88,3	0	141,4	12,3	0,9
3	1,8	18,7	0,0	112,3	24,8	0	59,2	0,80	1002	1275	1320	1202	14,0	3,7	200	12	6,5	88	0	147,8	13,8	0,9
4	4,1	16,3	0,0	116,0	27,9	0	52,3	0,82	940	1260	1380	1320	12,4	4,6	600	25,7	20,8	74,3	0	146	17,1	0,8
5	4,0	16,3	0,0	121,3	27,9	0	73,3	0,86	940	1090	1100	1010	12,3	4,3	600	26,8	20,2	73,2	0	148,1	-	0,9
Совместное сжигание биомассы и угля																						
6	0,0	26,3	3,0	117,1	24,8	80	56,5	0,47	1380	1445	1405	1290	18,1	0,6	-	0	2,9	92,9	7,1	172,9	17,2	0,8
7	0,0	18,7	7,1	130,2	27,9	80	70,4	0,78	1445	1445	1415	1305	17,3	1,2	200	0	13,9	80,9	19,1	154,4	17,2	0,7
8	0,0	18,7	5,0	129,8	27,9	80	75,9	0,85	1445	1445	1405	1330	16,8	2,0	-	0	8,4	85,7	14,3	145,7	14,0	0,7

Примечания:

* – тепловая доля природного газа/опилок с учетом их затраты на нагревание воздуха к 320°С что имеет место на реальной ТЭС.

В процессе отработки поисковых экспериментов была установлена минимальная величина (см. табл. 2, режим 3) расхода «подсветочного» газа, обеспечивающего стабильное горение антрацита, равная 6,5% с учетом доли газа, затрачиваемого на подогрев воздуха до 320 °С, которая расходуется в реальном парогенераторе.

Данные опытов с совместным сжиганием антрацита с тырсой приведены в табл. 2 (режимы 6, 7, 8). В опытах доля сжигаемой биомассы варьировалась в пределах 2,9...13,9% по теплу с учетом доли теплоты, расходуемой на подогрев воздуха. Важно отметить, что степень конверсии углерода антрацита при совместном его сжигании с биомассой, определенная на основе учета предварительно определенного значения степени конверсии биомассы при ее сжигании с газом, находится в удовлетворительном соответствии с данными, найденными при индивидуальном сжигании антрацита. На основании найденных таким образом значений степени конверсии углерода антрацита представляется возможным определить оптимальную долю древесины, обеспечивающую наряду со стабильностью факела также и максимальную степень конверсии углерода.

На (рис. 4) приведены результаты измерения температур в реакторе и степень конверсии угля при его подсветке природным газом и совместном его сжигании с тырсой. Как видно из приведенных результатов, даже при подаче биомассы в количестве 2,9% по теплу удалось полностью отказаться от подсветки факела природным газом, хотя степень конверсии угля несколько снизилась по сравнению с режимом газовой подсветки. Вместе с тем, отчетливо видно, что существенно повысилась температура ядра факела.

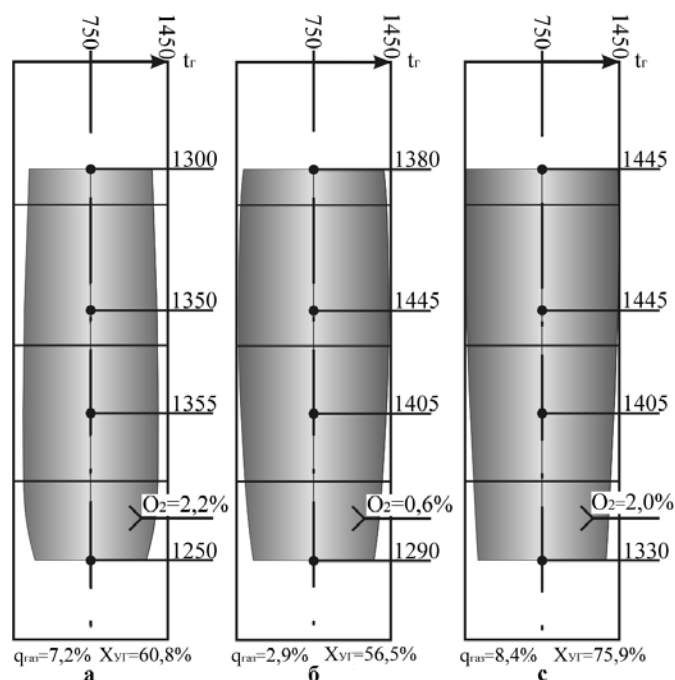


Рис. 4. Распределение температур в реакторе ($^{\circ}\text{C}$) и сравнение степени конверсии угля при его подсветке природным газом (а – режим 2) и тырсой (б – режим 6, в – режим 8)

При увеличении подачи биомассы до 8,4% по теплу наблюдается существенное увеличение степени конверсии, а также осязаемое удлинение факела, что, по-видимому, объясняется увеличением зоны выгорания коксового остатка частиц биомассы, размер которых существенно превышает размер частиц антрацита.

При дальнейшем увеличении доли биомассы при сохранении стабильности факела и высокой теплонапряженности объема реактора, наблюдалось снижение степени конверсии углерода. Данное обстоятельство объясняется тем, что

высокореакционное топливо, каковым в данном случае является тырса, интенсивно потребляет кислород воздуха в высокотемпературной зоне ядра факела, ухудшая тем самым условия выгорания угля. Исходя из приведенного выше, определена оптимальная тепловая доля биомассы, равная 8-10%. Подача такого количества тырсы в режимах совместного сжигания высокозольного антрацита и биомассы обеспечивает стабилизацию факела без газовой подсветки, а также наивысшую степень конверсии углерода угля.

Однако, время пребывания частиц топлива в установке ВГП-100В составляет ~ 0.8 секунды, чего недостаточно для полного выгорания смеси. Кроме того, ряд исследователей указывают на то, что время выгорания частиц кокса биомассы может превышать таковое для коксов угля в 2 раза. Учитывая это, а также необходимость оценки необходимого времени пребывания древесины до её полного выгорания в котельном оборудовании, в дальнейшем проводилось исследование скорости горения коксозольных частиц древесины на установке РСК-1Д Института, которая представляет собой вертикальный безградиентный импульсный реактор кипящего слоя.

Лабораторная установка РСК-1-Д (рис. 5) предназначена для изучения кинетики взаимодействия твердых топлив и коксов с газами-реагентами при температуре до 1250°C , работает в режимах близких к идеальному вытеснению по газовой фазе, позволяет поддерживать при проведении экспериментов малые градиенты температур (менее 10 К) и давлений (менее 200 Па) в зоне реакции по высоте навески. Интенсивное перемешивание топливных частиц обеспечивает режим идеального смешения по твердой фазе, а также практически однородную концентрацию газа-реагента по слою образца.

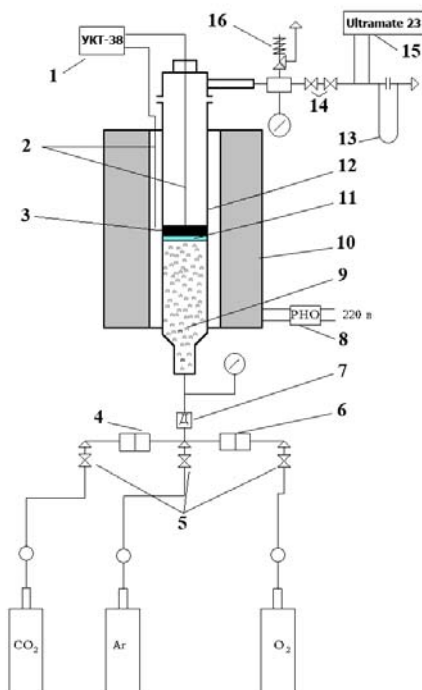


Рис. 5. Лабораторная установка РСК-1-Д. 1 – АЦП; 2 – термопары; 3 – навеска древесины; 4 – поглотитель O_2 и осушитель; 5 – игольчатые краны; 6 – поглотитель CO_2 и осушитель; 7 – дозирующее устройство; 8 – регулятор напряжения; 9 – засыпка окиси магния; 10 – трубчатая печь; 11 – перфорированная решетка; 12 – реактор; 13 – реометр; 14 – игольчатый кран; 15 – газоанализатор; 16 – взрывной клапан.

Скорости горения коксозольных частиц древесины в кислороде воздуха находились при помощи кинетических констант, определение которых связано с предположением о существовании макрокинетических областей реагирования, в которых удельная скорость реагирования R_m обладает рядом особенностей: 1) внутрикинетическая область - изменение размера частиц (d) и линейной скорости газового потока (U_g) практически не влияет на R_m . При этом график зависимости $\ln(R_m) = f(1/T)$ описывается прямой линией; 2) внутридиффузионная область – изменение U_g слабо влияет на R_m , а с увеличением d происходит уменьшение R_m ; 3) внешнедиффузионная область – увеличение d приводит к уменьшению R_m (иногда в виде $R_m \sim 1/d^2$).

В ходе экспериментов по импульсной методике, начальная масса углерода m_0 в образце последовательно уменьшалась на величину Δm ($\Delta m \ll m_0$) за время импульса Δt в связи с переходом углерода газообразные продукты реакции, расход которых контролировался ротаметром, а компонентный состав – газоанализатором. Последующая обработка результатов измерений сводилась к перерасчету объемных расходов измеряемых газов CO и CO_2 в массовые, определялось уменьшение массы углерода образца за время импульса.

Результаты определения зависимости удельной скорости выгорания углерода кокса древесины (размер частиц 0,1–0,5 мм) от обратной температуры (диапазон температур в исследовании 390–560 °C), которые были проведены по приведенной выше методике, показаны на (рис. 6) в полулогарифмических координатах. Как видно из графика, в исследуемом диапазоне температур, размер частиц кокса древесины, не влияет на скорость взаимодействия с кислородом воздуха, что указывает на наличие внутрикинетического режима горения исследуемого образца.

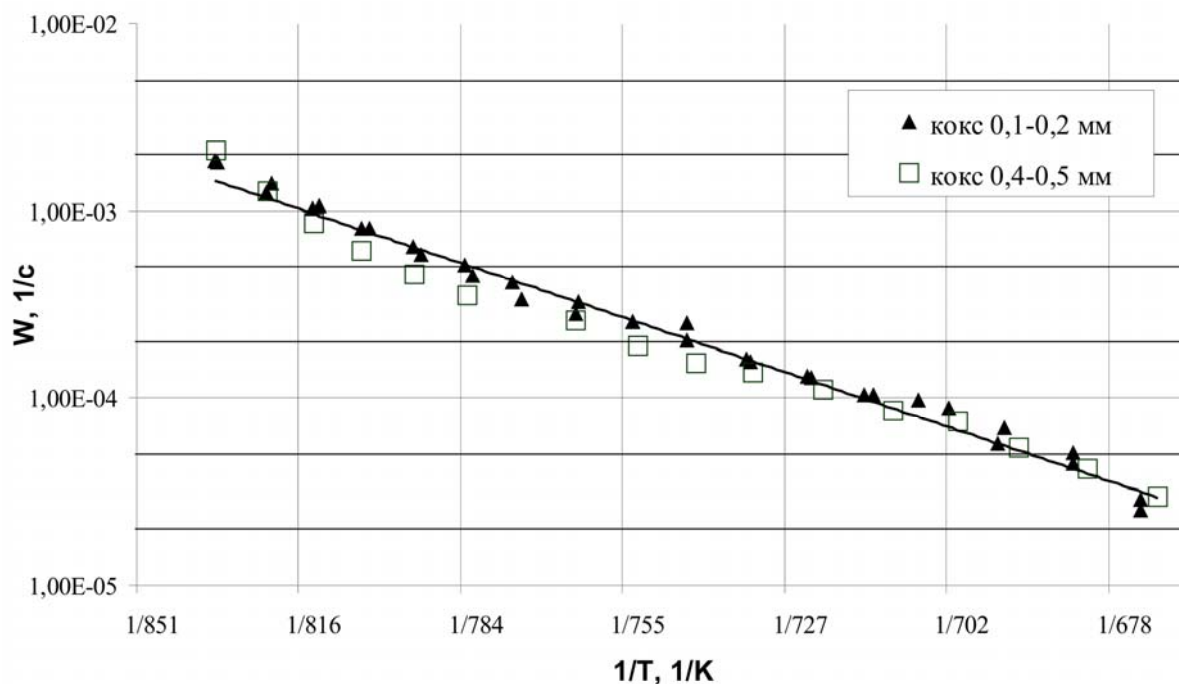


Рис. 6. Зависимость удельной скорости выгорания углерода кокса древесины от обратной температуры

Анализируя полученную линейную зависимость по приведенной выше методике, получаем константу скорости реакции $K_{0I}=1,3 \cdot 10^4$ [1/с]/[кг/м³] и энергию активации $E=111,2$ кДж/моль. Поскольку исследование удельной поверхности частиц кокса древесины не проводилось, значение константы K_{0II} не определялось. В дальнейшем планируется расширить диапазон температур и размера частиц и определить кинетические характеристики коксов биомассы в других областях горения. Полученные в исследованиях значения кинетических констант горения кокса древесины в следующем были использованы в качестве входных данных для проектирования, путем компьютерного моделирования в программах CFD, и последующего изготовления муфельных горелочных устройствах для котлоагрегата ДКВР 2,5.

Выводы

Проведенные исследования показали эффективность и возможность применения технологии совместного сжигания угля и биомассы на действующих пылеугольных антрацитовых котлоагрегатах. Полученные в экспериментальных исследованиях оптимальные соотношения требуют дальнейшей промышленной проверки.

Полученные кинетические константы скорости горения коксов древесины могут использоваться для дальнейшего проектирования энергетического оборудования сжигающего древесину как отдельно, так и совместно с углем.

Литература

1. Гелетуха Г.Г., Жовмир Н.М., Олейник Е.Н., Радченко С.В. Биомасса как топливное сырье // Промышленная теплотехника, 2011, т. 33, №5, с.76-84
2. Darren D. Schmidt, Vasu S. Pinapati. Opportunities for small biomass power systems // DOE Contract No. DE-FGO2-99EE35 128
3. Енергетичний потенціал біомаси в Україні / [Лакида П.І., Гелетуха Г.Г., Васишин Р.Д., та ін.], відповід. наук. ред. д.с.г.н., проф. П.І. Лакида; Навчальнонауковий інститут лісового і садовоопаркового господарства НУБіП України. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2011. – 28 с.
4. Чернявский Н.В., Дунаевская Н.И. Динамика конверсии малометаморфизированных углей при газификации в потоке // Труды Всесоюзн. симпоз. «Проблемы газификации углей». – Красноярск: КАТЭКНИИЭнергетики, 1991. – С.76–83