



## УДК 662.74

**Д.В. МИРОШНИЧЕНКО**, канд. техн. наук, с.н.с., заместитель заведующего отделом, **Я.С. БАЛАЕВА**, научный сотрудник  
ГП «Украинский государственный научно-исследовательский углехимический институт» (УХИН), г. Харьков

## РАСЧЕТНЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСШЕЙ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ УГЛЕЙ НА ВЛАЖНОЕ БЕЗЗОЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ

На основании комплексных исследований угольных концентратов, входящих в современную сырьевую базу коксохимических предприятий Украины, определены математические зависимости, позволяющие по показателям качества углей прогнозировать их высшую теплоту сгорания на влажное беззольное состояние.

**Ключевые слова:** уголь, показатели качества, высшая теплота сгорания на влажное беззольное состояние, методика, математические уравнения.

Согласно [1] ископаемые угли подразделяют на бурые, каменные и антрациты в зависимости от значения величины среднего показателя отражения витринита, теплоты сгорания на влажное беззольное состояние и выхода летучих веществ (табл. 1).

Как видно из табл. 1, разделение углей на бурые и каменные происходит по значению высшей теплоты сгорания на влажное беззольное состояние углей. Актуальность определения этого показателя возросла после введения в действие приказа государственной таможенной службы [2], согласно которому ввозимая в Украину угольная продукция должна обязательно классифицироваться по высшей теплоте сгорания на влажное беззольное состояние.

Если средний показатель отражения витринита и выход летучих веществ входят в контроль качества угольного сырья практически на всех коксохимических предприятиях, то для расчета теплоты сгорания на влажное беззольное состояние (формулы 1–3) [3] необходимо определить максимальную влагоемкость угля [4]. Однако это способны делать лишь некоторые углехимические лаборатории [5, 6].

$$Q_s^{af} = Q_s^{daf} \cdot \frac{100 - W_{max}^{af}}{100}, \quad (1)$$

где  $Q_s^{daf}$  – высшая теплота сгорания пробы угля на сухое беззольное состояние, ккал/кг;  $W_{max}^{af}$  – максимальная влагоемкость пробы угля на влажное беззольное состояние, %.

$$W_{max}^{af} = W_{max} \cdot \frac{100}{100 - A^r}, \quad (2)$$

где  $A^r$  – зольность пробы угля на рабочее состояние, %.

$$A^r = A^a \cdot \frac{100 - W_{max}}{100}, \quad (3)$$

где  $A^a$  – зольность аналитической пробы угля, %;  
 $W_{max}$  – максимальная влагоемкость пробы угля, %.

В работе [7] проведено комплексное исследование по определению теплоты сгорания на влажное беззольное состояние. Исследованные 104 пробы углей были распределены по маркам следующим образом: Д – 22; Г – 58; Ж – 24.

После математической обработки статистического ряда численных величин высшей теплоты сгорания на сухое и влажное беззольное состояние было получено уравнение прямой, выражающее зависимость между  $Q_s^{daf}$  и  $Q_s^{af}$ :

$$Q_s^{af} = 2,275 \cdot Q_s^{daf} - 10895, \text{ ккал/кг.} \quad (4)$$

В табл. 2 приведено сравнение значений высшей теплоты сгорания на влажное беззольное состояние ( $Q_s^{af}$ ) со значениями высшей теплоты сгорания на сухое беззольное состояние ( $Q_s^{daf}$ ).

Ранее для польских углей в Главном институте горного дела (Катовице, Польша) была получена аналогичная зависимость [8] с несколькими другими значениями

**Таблица 1 – Виды ископаемого угля**

Вид угля	Средний показатель отражения витринита ( $R_v$ ), %	Теплота сгорания на влажное беззольное состояние ( $Q_s^{af}$ ), МДж/кг	Выход летучих веществ на сухое беззольное состояние ( $V^{daf}$ ), %
Бурый	менее 0,60	менее 24,0	–
Каменный	от 0,40 до 2,59	от 24,0	от 8,0
Антрацит	от 2,20	–	менее 8,0

**Таблица 2 – Сравнение величин  $Q_s^{af}$  и  $Q_s^{daf}$**

Высшая теплота сгорания на влажное беззольное состояние ( $Q_s^{af}$ ), ккал/кг	Высшая теплота сгорания на сухое беззольное состояние ( $Q_s^{daf}$ ), ккал/кг
более 7750	более 8200
7200–7750	7950–8200
6100–7200	7450–7950
менее 6100	менее 7450

коэффициентов, что вызвано, по мнению авторов работы [7], иной природой исследованных углей.

Необходимо отметить, что авторами работы [9] были проведены исследования, связанные с изменением максимальной влагоемкости в зависимости от показателя отражения витринита. Как показал математический анализ, в области  $R_0 = 0,5–1,15\%$  значения максимальной влагоемкости  $W_{max}$  при корреляционном отношении 0,99 и остаточном отклонении для усредненных точек 0,23% описываются уравнением

$$W_{max} = \exp(9,069 - 14,796 \cdot R_0 + 6,348 \cdot R_0^2). \quad (5)$$

В области  $R_0 = 1,15–2,90\%$  с ростом стадии метаморфизма значения максимальной влагоемкости линейно увеличиваются в соответствии с уравнением

$$W_{max} = 2,04 \cdot R_0 - 0,8 \quad (6)$$

при аналогичных оценках тесноты связи.

Отметим, что зависимость (4) была получена для петрографически однородных донецких углей. С тех пор угольная сырьевая база коксохимических предприятий претерпела существенные изменения и теперь носит

сложный межбассейновый характер, поэтому представляется целесообразным разработать математические уравнения, позволяющие на основе характеристики состава и/или свойств углей прогнозировать величины их высшей теплоты сгорания на влажное беззольное состояние.

Для установления зависимости  $Q_s^{af}$  от свойств углей [10, 11] в условиях современной сырьевой базы коксования производились исследования 31 пробы угольных концентратов следующих марок: Г + ГЖ + ГЖО – шесть; Ж – 14; К – восемь; КО + КС + ОС – три. В общую выборку было включено 13 украинских, 11 российских, шесть американских углей и один польский уголь.

Максимумы и минимумы, а также интервалы значений технологических свойств, петрографических показателей, окисленности, элементного состава и теплоты сгорания на сухое и влажное беззольное состояние исследованных углей приведены в табл. 3–5. Как следует из анализа данных этих таблиц, значения показателей качества исследованных угольных концентратов колеблются в довольно широком интервале, что говорит о представительности выборки. Кроме того, данные угли не окислены ( $\Delta t < 6\text{ }^\circ\text{C}$ ), чем обусловлена неискаженность значений показателей их качества [12, 13].

Статистический анализ показал, что с величиной теплоты сгорания на влажное беззольное состояние наиболее тесно связаны показатели, представленные в табл. 6.

На рис. 1–6 приведены графические, а в табл. 7 – математические зависимости между высшей теплотой сгорания на влажное беззольное состояние и указанными показателями качества углей. Как видно из указанных данных, зависимость теплоты сгорания на влажное беззольное состояние от показателей качества углей (кроме  $Q_s^{daf}$ ) носит квадратичный характер и имеет экстремум

**Таблица 3 – Максимумы, минимумы и интервалы значений технологических свойств и показателя окисленности исследованных угольных концентратов**

Значение	Технический анализ, %				Максимальная влагоемкость, % $W_{max}$	Толщина пластического слоя, мм $y$	Окисленность, $^\circ\text{C}$ $\Delta t$
	$W^a$	$A^d$	$S_t^d$	$V^{daf}$			
Max	2,9	10,9	2,49	41,3	8,7	27	5
Min	0,4	5,9	0,25	19,8	1,5	6	1
Интервал	2,5	5,0	2,24	21,5	7,2	21	4

**Таблица 4 – Максимумы, минимумы и интервалы значений петрографических показателей исследованных угольных концентратов**

Значение	Петрографический состав (без минеральных примесей), % Vt Sv I L $\Sigma OK$					Средний показатель отражения витринита, % $R_0$	Стадии метаморфизма витринита, %						
							менее 0,50	0,50–0,65	0,66–0,89	0,90–1,19	1,20–1,39	1,40–1,69	1,70–2,59
							Марки угля, условно соответствующие стадиям метаморфизма витринита						
							Д	ДГ	Г	Ж	К	ОС	Т
Max	92	2	64	10	66	1,56	2	62	87	98	49	86	12
Min	33	0	5	0	6	0,66	0	0	0	0	0	0	0
Интервал	59	2	59	10	60	0,90	2	62	87	98	49	86	12



Таблица 5 – Максимумы, минимумы и интервалы значений элементного состава, высшей теплоты сгорания на сухое и влажное беззольное состояние исследованных угольных концентратов

Значение	Элементный состав, %					Высшая теплота сгорания на сухое беззольное состояние, МДж/кг ккал/кг	Высшая теплота сгорания на влажное беззольное состояние, МДж/кг ккал/кг
	$C^{daf}$	$H^{daf}$	$N^{daf}$	$S_t^d$	$O_d^{daf}$	$Q_s^{daf}$	$Q_s^{af}$
Max	91,14	6,27	2,82	2,49	8,34	<u>36,50</u> 8718	<u>35,89</u> 8572
Min	82,49	4,92	1,09	0,25	2,17	<u>33,72</u> 8054	<u>30,80</u> 7356
Интервал	8,65	1,35	1,73	2,24	6,17	<u>2,78</u> 664	<u>5,09</u> 1216

Таблица 6 – Коэффициенты парной корреляции

Показатель	Символ, %	Коэффициент парной корреляции r
Аналитическая влага	$W^a$	-0,926
Высшая теплота сгорания на сухое беззольное состояние	$Q_s^{daf}$	0,926
Максимальная влагоемкость	$W_{max}$	-0,902
Содержание углерода	$C^{daf}$	0,765
Показатель отражения витринита	$R_0$	0,747
Выход летучих веществ	$V^{daf}$	-0,641

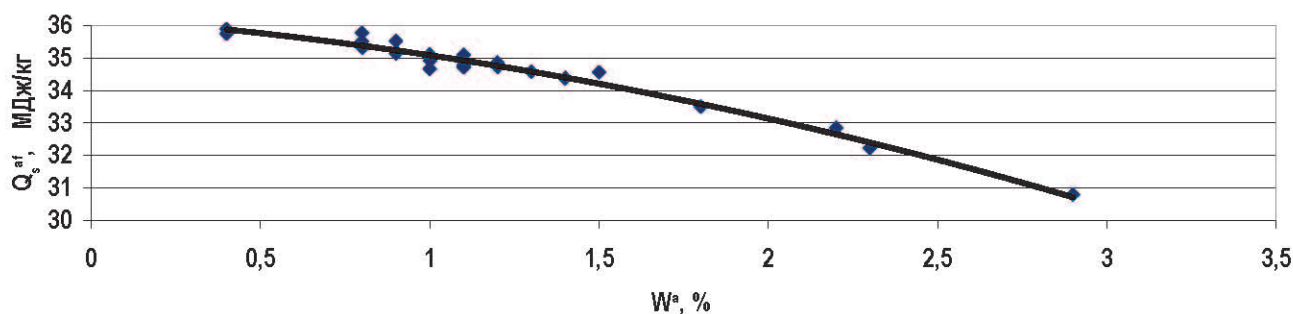


Рисунок 1 – График зависимости между  $Q_s^{af}$  и  $W^a$

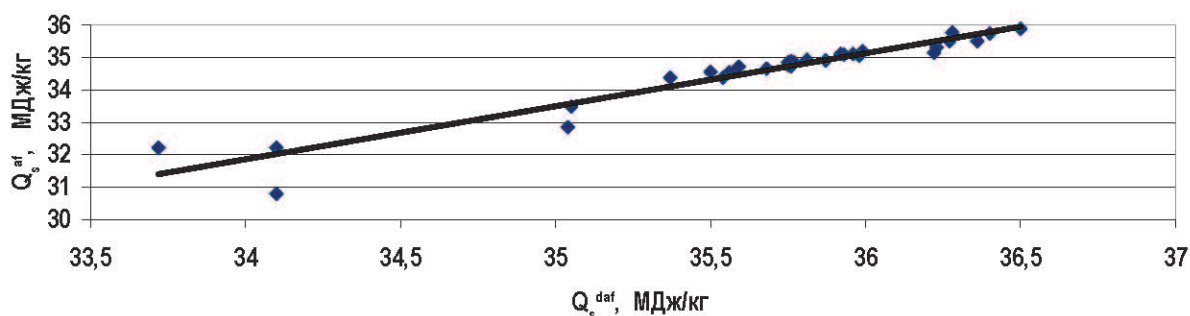


Рисунок 2 – График зависимости между  $Q_s^{af}$  и  $Q_s^{daf}$

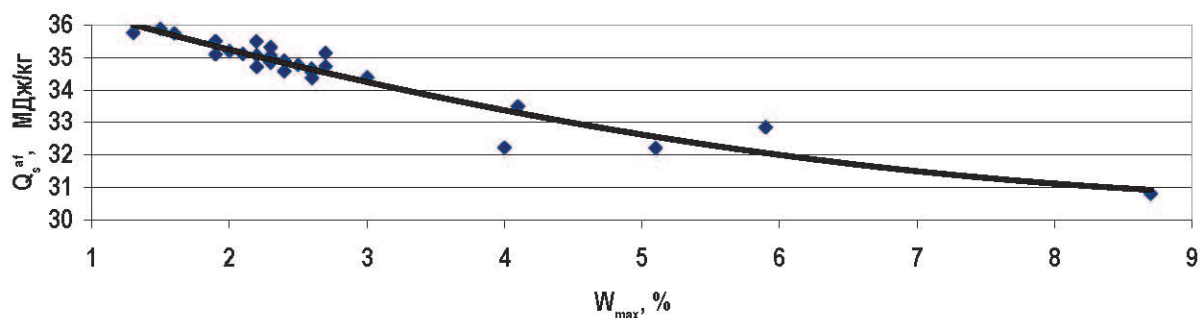


Рисунок 3 – График зависимости между  $Q_s^{af}$  и  $W_{max}$

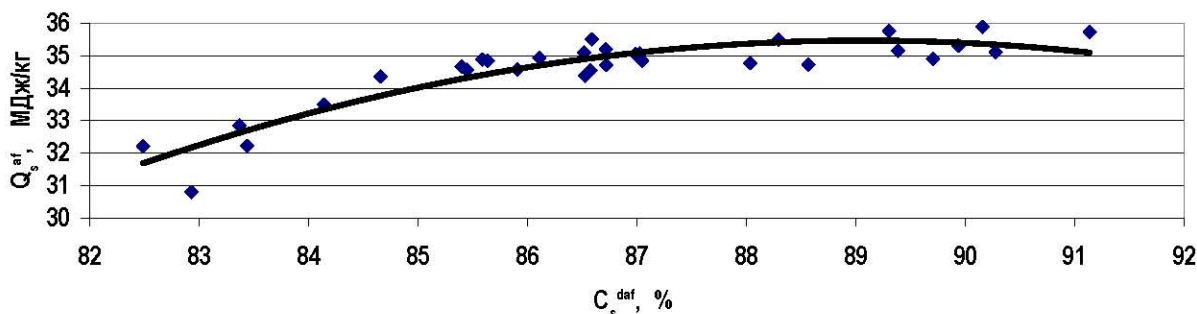


Рисунок 4 – График зависимости между  $Q_s^{af}$  и  $C_s^{daf}$

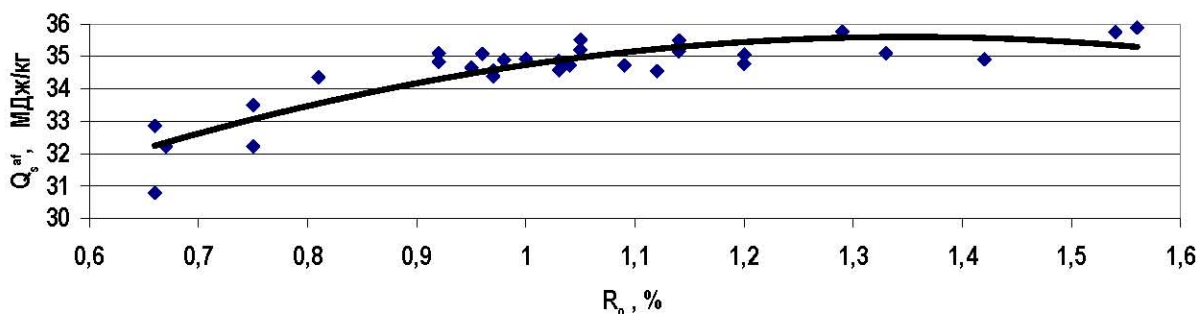


Рисунок 5 – График зависимости между  $Q_s^{af}$  и  $R_0$

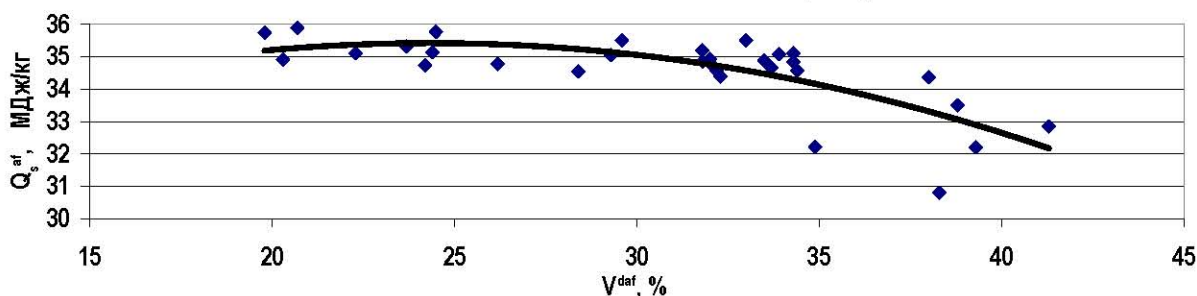


Рисунок 6 – График зависимости между  $Q_s^{af}$  и  $V^{daf}$

Таблица 7 – Математические уравнения и статистическая оценка

Номер уравнения	Математические уравнения	Статистическая оценка		
		R	D, %	$\sigma$ , МДж/кг
(7)	$Q_s^{af} = -0,3909 \cdot (W^a)^2 - 0,776 \cdot W^a + 36,251$	0,989	97,85	0,168
(8)	$Q_s^{af} = 1,6373 \cdot Q_s^{daf} - 23,803$	0,957	91,50	0,322
(9)	$Q_s^{af} = 0,0617 \cdot (W_{max})^2 - 1,3061 \cdot W_{max} + 37,615$	0,955	91,25	0,327
(10)	$Q_s^{af} = -0,0875 \cdot (C^{daf})^2 + 15,583 \cdot C^{daf} - 658,56$	0,912	83,11	0,433
(11)	$Q_s^{af} = -7,050 \cdot (R_0)^2 + 19,043 \cdot R_0 + 22,747$	0,884	78,18	0,477
(12)	$Q_s^{af} = -0,0113 \cdot (V^{daf})^2 + 0,5491V^{daf} + 28,742$	0,744	55,28	0,575

Примечание. R – коэффициент корреляции; D – коэффициент детерминации;  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение.

в области  $R_0 = 1,1-1,4$  %, что согласуется с результатами работы [14], полученными для высшей теплоты сгорания на сухое беззольное состояние.

Из всех разработанных уравнений только (7) характеризуется величиной среднего квадратичного отклонения, не превышающего погрешности определения теплоты сгорания ( $<0,3$  МДж/кг) согласно [15].

Для удобства выполнения расчетов было разработано математическое уравнение 1-й степени, включающее не только показатель аналитической влаги, но и широко распространенный показатель выхода летучих веществ, с помощью которого можно охарактеризовать степень метаморфизма угля (табл. 8).



**Таблица 8 – Зависимость высшей теплоты сгорания на влажное беззольное состояние от аналитической влаги и выхода летучих веществ**

Номер уравнения	Математическая модель	Статистическая оценка		
		R	D, %	$\sigma$ , МДж/кг
(13)	$Q_s^{af} = -1,925 \cdot W^a + 0,001916 \cdot V^{daf} + 36,988$	0,959	97,9	0,26

### ВЫВОДЫ

Проведено комплексное исследование угольных концентратов Украины, России, США и Польши, входящих в современную сырьевую базу коксования.

Разработаны математические уравнения, позволяющие по данным показателей качества углей прогнозировать значения высшей теплоты сгорания на влажное беззольное состояние.

С учетом математической зависимости высшей теплоты сгорания на влажное беззольное состояние от аналитической влаги и выхода летучих веществ (эта зависимость характеризуется величиной среднего квадратичного отклонения, не превышающей допустимую погрешность определения) разработана «Методика определения высшей теплоты сгорания угля на влажное беззольное состояние ( $Q_s^{af}$ )», которая рекомендована коксохимическим предприятиям Украины для использования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- ГОСТ 25543-88. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам. – Введ. : 1990-01-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 14 с.
- Приказ таможенной службы Украины № 717 от 04.07.08 г. «Про внесення змін до Класифікатора додаткової інформації, яка вноситься до графі 31 ВМД, необхідної для ідентифікації товарів при їх класифікації згідно з УКТЗЕД».
- ГОСТ 27313-95 (ISO 1170-77). Топливо твердое минеральное. Обозначение показателей качества и формулы пересчета результатов анализа для различных состояний топлива. – Введ. : 1997-01-01. – Минск : ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 12 с.
- ГОСТ 8858-93 (ISO 1018-75). Угли бурые, каменные и антрацит. Метод определения максимальной влагоемкости. – Введ. : 1996-01-01. – М. : Госстандарт России, 1996. – 18 с.
- Стандартные методы испытания углей. Классификации углей / И.В. Авгушевич, Т.М. Броневец, Г.С. Головин, Е.И. Сидорук, Л.В. Шуляковская. – М. : НТК «Трек», 2008. – 368 с.
- Справочник коксохимика / Под ред. А.К. Шелкова. Т. I. Сырьевая база и подготовка углей к коксованию. – М. : Metallurgia, 1964. – 490 с.
- Двужильная Н.М. Теплота сгорания влажного беззольного угля (К вопросу установления класса донецких углей по международной классификации) / Н.М. Двужильная, П.А. Егоркин // Исследование и классификация углей : сб. ДОНУГИ. – М. : ГОСГОРТЕХИЗДАТ, 1962. – № 25. – С.10-16.
- Рога Б. Химические свойства и классификация каменных углей / Б. Рога, А. Игнатович // Prace Głównego Instytutu Górnictwa, Seria B, № 142, Stalinograd. 1954.
- Еремин И.В. Петрология и химико-технологические параметры углей Кузбасса / И.В. Еремин, А.С. Арцер, Т.М. Броневец. – Кемерово, 2000. – 389 с.
- Справочник по качеству каменных углей и антрацитов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов. – М. : Недра, 1972. – 168 с.
- Теплота сгорания углей / Д.В. Мирошниченко, Я.С. Балаева, Е.Б. Прибавкина, В.Д. Григорьева // Углекимический журнал. – 2013. – № 1-2. – С. 3-15.
- Десна Н.А. Использование окисленных углей при коксовании (Обзор) / Н.А. Десна, Д.В. Мирошниченко // Кокс и химия. – 2011. – № 5. – С. 2-9.
- Лабораторные и опытно-промышленные коксования угольных шихт с различным долевым участием окисленных углей / Д.В. Мирошниченко, И.Д. Дроздник, Ю.С. Кафтан, Н.Б. Бидолленко, Н.А. Десна // Кокс и химия. – 2012. – № 5. – С. 6-16.
- Еремин И.В. Петрография и физические свойства углей / И.В. Еремин, В.В. Лебедев, Д.А. Цикарев. – М. : Недра, 1980. – 263 с.
- ДСТУ 1928:2006 (ISO 1928:1995, IDT). Паливо тверде мінеральне. Визначення найвищої теплоти згорання методом спалювання в калориметричній бомбі та обчислення найнижчої теплоти згорання.

Поступила в редакцию 11.04.2013

На підставі комплексних досліджень вугільних концентратів, що входять в сучасну сировинну базу коксохімічних підприємств України, визначено математичні залежності, які дозволяють за показниками якості вугілля прогнозувати їх найвищу теплоту згорання на вологий беззольний стан.

Based on comprehensive research of coal concentrates entering into present-day resource base of by-product coke plants of Ukraine it is defined mathematical relationships enable on coal quality parameters forecasting their high heat value on wet ash-free condition.