

---

УДК 541.123.546.2183

## РАСТВОРИМОСТИ ТРОТИЛА И ЕГО ЭКСТРАКЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИЗ ЖЕСТКИХ СГРАЮЩИХ КАРТУЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСТОГО И МОДИФИЦИРОВАННОГО СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО СО<sub>2</sub>

<sup>1,2</sup>Т. Р. Билалов\*, <sup>1</sup>Ф. М. Гумеров, <sup>2</sup>Р. Ф. Гатина

<sup>1</sup>*Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия*

<sup>2</sup>*Федеральное казенное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт химических продуктов», Казань, Россия*

\*t.bilalov@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.05.2016 г.

Исследована растворимость тротила в чистом и модифицированном сверхкритическом (СК) диоксиде углерода при 308,15—333,15 К и 10—35 МПа. Экспериментальные данные описаны с использованием уравнения Пенга — Робинсона. Представлены результаты извлечения тротила экстракцией СК-СО<sub>2</sub> из образцов жесткого сгорающего картуза и показана эффективность этого процесса.

**Ключевые слова:** сверхкритический диоксид углерода, тротил, растворимость, динамический режим, экстракция.

---

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при изготовлении комплектующих (гильз, жестких сгорающих картузов) для метательных зарядов артиллерийских и минометных выстрелов получили широкое распространение сгорающие материалы (СМ). Это обусловлено их значительными преимуществами перед металлическими гильзами или тканевыми картузами [1—3]. Как любая упаковка, жесткие сгорающие картузы (ЖСК) должны, прежде всего, предохранять метательный заряд (МЗ) от внешних атмосферных воздействий с сохранением его свойств при эксплуатации и в течение гарантийных сроков хранения.

Современный технологический процесс изготовления ЖСК методом фильтрационного литья является многостадийным дискретно-непрерывным процессом с циклической и непрерывной работой аппаратов, требующим согласования интенсивностей материальных потоков всех операций:

- фазы подготовки компонентов;
- фазы формирования изделий;
- фазы конечных операций [4].

Одним из основных компонентов, применяемых в процессе производства ЖСК, является тротил (2,4,6-тринитротолуол) [5].

Утилизация отработанных или снятых с вооружения ЖСК и отходов их производства является одной из актуальных задач, прежде всего, по соображениям экологии и ресурсосбережения. В настоящее время утилизация большей части

подобных изделий осуществляется методом их сжигания или подрыва [6, 7, 8], что, несомненно, приносит большой урон окружающей среде вследствие выделения вредных продуктов горения, а также приводит к безвозвратной потере ценных компонентов, пригодных для повторного использования [9]. Особенностью ЖСК является то, что в их состав входит тротил, который используется также и в других видах боеприпасов.

В связи с вышесказанным актуальной является задача поиска экологически безопасных и экономически целесообразных методов утилизации списанного вооружения. В частности, удаление тротила из жестких сгорающих картузов превращает их в относительно безопасный материал, пригодный для дальнейшей переработки. Экономически эффективное удаление тротила может быть осуществлено методом экстракции с использованием сверхкритического диоксида углерода. В разработке такой технологии мог оказаться полезным опыт авторов по проведению экспериментальных исследований и разработке технологии удаления коксовых отложений с поверхности различных отработанных катализаторов [10, 11, 12]. Хотя физико-химические основы этих двух процессов весьма различны, используемое экспериментальное и технологическое оборудование и последовательность технологических операций могут быть аналогичными.

Оптимизация процесса извлечения тротила предполагает наличие надежных данных по его растворимости в чистом и модифицированном СК-СО<sub>2</sub> в широком диапазоне изменения параметров состояния в сочетании с результатами исследования экстракционного процесса как такового.

Недостаточность литературных данных по растворимости и отсутствие исследований по извлечению тротила из жестких сгорающих картузов методом экстракции сверхкритическим СО<sub>2</sub> определили предмет настоящего исследования.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

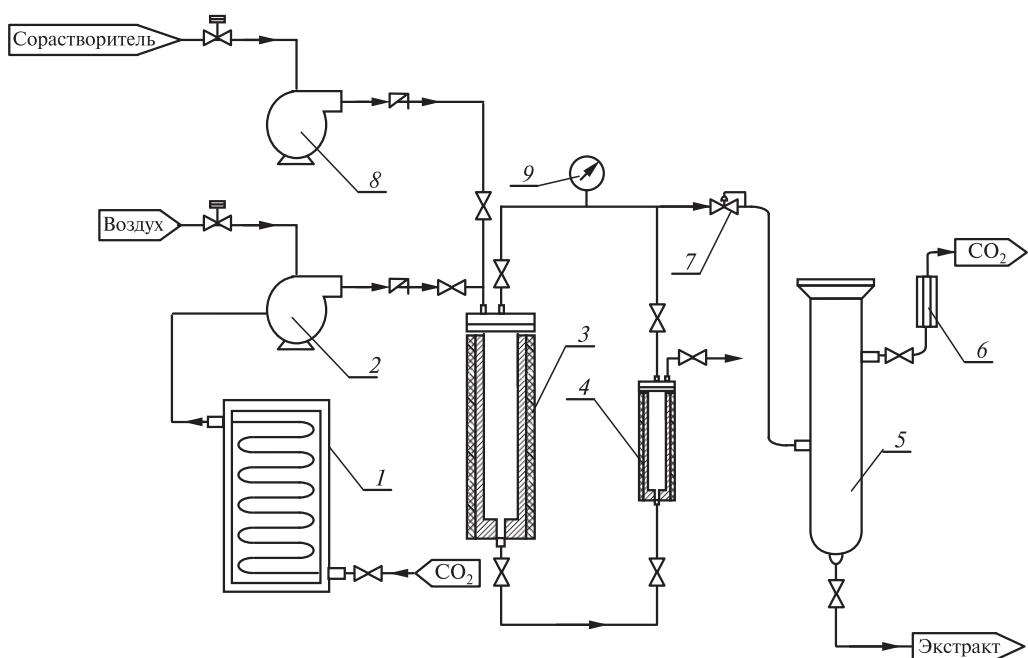
В работе использованы следующие реагенты:

- углекислота первого или высшего сорта с содержанием СО<sub>2</sub> не менее 99,5 %;
- тротил марки Б, соответствующий ГОСТ 4117-78;
- образцы ЖСК, в состав которых входит тротил в количестве 25 % масс.;
- этанол и ацетон марок «ч.д.а».

Для исследования растворимости тротила в чистом и модифицированном СК-СО<sub>2</sub> использована экспериментальная установка циркуляционного типа (рис. 1), созданная на базе сверхкритической флюидной экстракционной системы R-401 производства компании «Reaction Engineering Ink.» (Южная Корея). В ней может быть реализован динамический режим исследования искомой величины при температурах до 100 °C и давлениях до 40,0 МПа.

Ресивер (3) и экстракционная ячейка (4) имеют объемы 1,5 и 0,1 л соответственно. Ресивер минимизирует пульсации давления и расхода газа. Насос (2) для подачи диоксида углерода имеет производительность, обеспечивающую работу установки при расходах СО<sub>2</sub> в заданном диапазоне. Она регулируется пневматически с помощью изменения давления сжатого воздуха, подаваемого в насос (2) внешним компрессором. Давление в системе контролируется датчиком давления класса точности 0,5, данные от которого поступают на вторичный прибор, управляющий насосом. Точность поддержания давления составляет ±0,025 МПа.

В системе присутствует образцовый манометр (9) класса точности 0,15, показания которого принимаются в качестве рабочих. Расход газа контролируется и



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки:

1 — холодильник; 2 — насос для подачи  $\text{CO}_2$  в систему; 3 — ресивер с системой нагрева и термостатирования; 4 — экстракционная ячейка с системой нагрева и термостатирования; 5 — сепаратор; 6 — массовый расходомер — регулятор расхода газа; 7 — регулятор давления «до себя»; 8 — насос для подачи сорастворителя; 9 — образцовый манометр

измеряется регулятором массового расхода (6) производства компании «Bronkhorst» (марка El-Flow F-201 CV), расположенным на выходе из сепаратора (5). Расходомер класса точности 0,25 позволяет регулировать расход  $\text{CO}_2$  в диапазоне от 0 до 0,59 г/мин. Система термостатирования позволяет поддерживать заданную температуру с точностью  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Для подачи сорастворителя используется насос (9) марки Eldex (модель Optos Pump 2SL).

В рамках методики проведения экспериментов навеска исследуемого вещества известной массы помещается в ячейку (4). Газ из баллона поступает в ванну холодильного аппарата (1), охлажденную до  $+0,5^\circ\text{C}$ , где происходит его охлаждение, и с помощью насоса (2) жидкий  $\text{CO}_2$  подается в ресивер. Там происходит нагрев газа до достижения им заданной температуры, после чего  $\text{CO}_2$  подается в ячейку с исследуемым веществом.  $\text{CO}_2$  растворяет в себе определенное количество исследуемого вещества и, проходя через регулятор давления «до себя» (7), поступает в сепаратор. В результате падения давления и растворяющей способности диоксида углерода, имеющих место в сепараторе, исследуемое вещество выпадает в осадок и собирается на дне сепаратора, а газообразный диоксид углерода через выход, расположенный в верхней части сепаратора, направляется в расходомер — регулятор расхода газа, который поддерживает заданный массовый расход  $\text{CO}_2$  и одновременно измеряет количество газа, прошедшего через систему. После того, как через систему проходит определенное количество диоксида углерода, ячейка отсекается вентилями на входе и выходе, давление в ней стравливается до атмосферного, навеска вещества извлекается и повторно взвешивается. По разнице начальной и конечной масс исследуемого вещества и количеству диоксида углерода, прошедш-

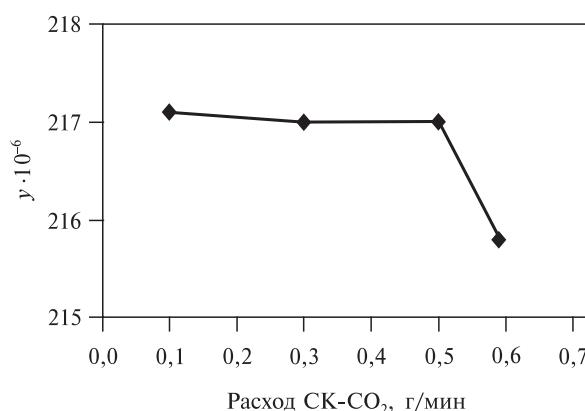
шего через систему в процессе растворения, оценивается концентрация растворенного вещества в растворителе. При достаточно длительном осуществлении контакта в системе «растворяемое вещество — растворитель» достигается постоянная концентрация, соответствующая понятию растворимости. Режим работы установки для определения растворимости выбирается на основе экспериментов по определению концентрации растворенного вещества в зависимости от расхода СК растворителя. Рабочий расход растворителя выбирается в пределах диапазона постоянства концентрации растворенного вещества. Корректность разработанной методики и работоспособность экспериментальной установки были подтверждены результатами пробных измерений растворимости стеариновой кислоты в чистом сверхкритическом диоксиде углерода, данные по которым представлены в работе [13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

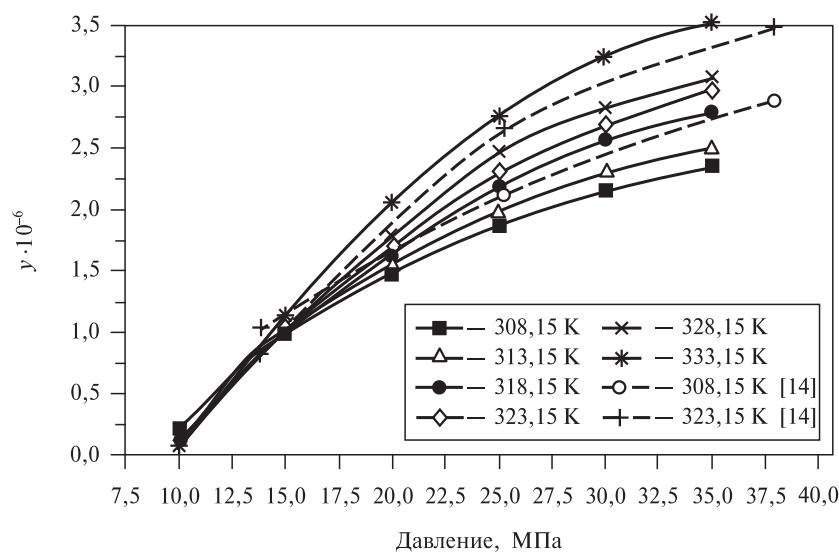
Как было отмечено выше, основному этапу исследования растворимости предшествовала оценка диапазона изменения расхода сверхкритического флюидного растворителя в проточной системе, обеспечивающего равновесную концентрацию растворенного вещества в СК- $\text{CO}_2$ .

На рис. 2 приведена экспериментально установленная зависимость концентрации тротила в СК- $\text{CO}_2$  от его массового расхода. Из него следует, что в диапазоне расходов 0—0,5 г/мин концентрация тротила практически не зависит от величины расхода растворителя, что является свидетельством равновесности этой концентрации и ее соответствия понятию растворимости. Как следствие, именно указанный выше диапазон изменения расхода растворителя в проточной системе и был выбран в качестве одного из режимных параметров при проведении основных измерений.

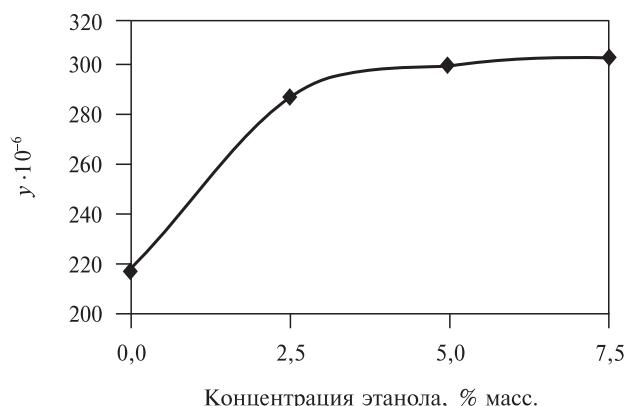
На рис. 3 представлены результаты экспериментального исследования растворимости тротила в СК- $\text{CO}_2$  на изотермах 308,15; 318,15; 323,15; 328,15 и 333,15 К в диапазоне давлений 10—35 МПа при расходе СК- $\text{CO}_2$  0,5 г/мин. Там же приведены литературные данные, представленные в работе [14]. Из графика видно, что полученные в настоящей работе величины растворимости ниже приведенных в литературе. Однако имеющие место расхождения находятся в пределах суммарной



**Рис. 2.** Зависимость мольной доли ( $y$ ) тротила в растворе от расхода СК- $\text{CO}_2$  при 308,15 К и 10 МПа



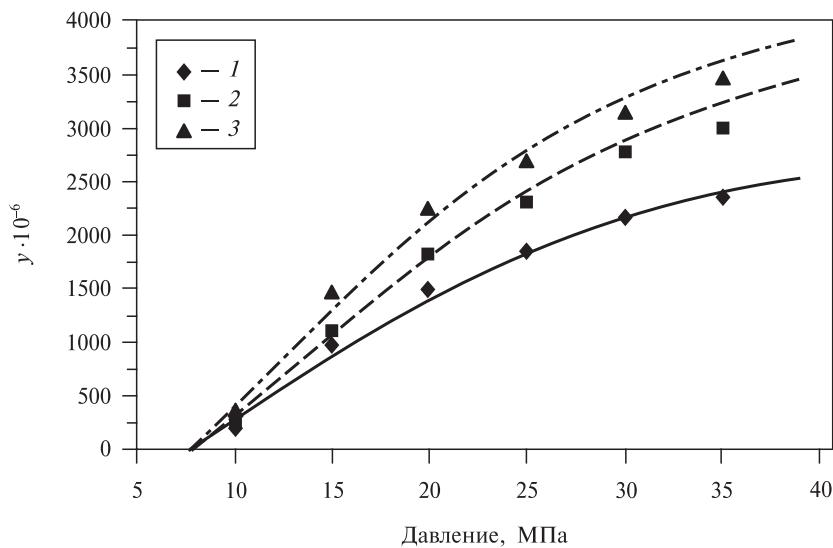
**Рис. 3.** Зависимость мольной доли ( $y$ ) тротила в насыщенном растворе в СК- $\text{CO}_2$  от давления; расход СК- $\text{CO}_2$  0,5 г/мин



**Рис. 4.** Зависимость мольной доли ( $y$ ) тротила в насыщенном растворе от концентрации соправорителя (этанола) в СК- $\text{CO}_2$  при 308,15 К и 1 МПа

погрешности результатов измерений. Вторая, или верхняя, кроссоверная точка [12], находящаяся в диапазоне давлений 12–15 МПа, разделяет области с противоположным характером поведения температурной зависимости растворимости тротила в СК- $\text{CO}_2$ .

Проведено исследование растворимости тротила в СК- $\text{CO}_2$ , модифицированном этанолом и ацетоном. Выбор этих полярных соединений (дипольный момент равен 2,28 Д у этанола и 2,71 Д у ацетона) [12] обусловлен их широким применением в этом качестве [12] и тем, что тротил достаточно хорошо растворим в них [15]. На предварительном этапе установлен характер зависимости растворимости тротила в СК- $\text{CO}_2$  от концентраций модификатора (рис. 4). Результаты исследования растворимости тротила в чистом и модифицированном СК- $\text{CO}_2$  представлены на рис. 5.



**Рис. 5.** Зависимость мольной доли ( $y$ ) тротила в насыщенном растворе в СК-СО<sub>2</sub> от давления при 308,15 К; концентрация сорасторовителей 2,5 % масс.:

1 — чистый СО<sub>2</sub>, 2 — СО<sub>2</sub>+этанол, 3 — СО<sub>2</sub>+ацетон; точки — эксперимент, линии — описание соответствующего эксперимента

Погрешность измерения растворимости, рассчитанная в соответствии с методикой [16, 17], изменяется в диапазоне от 5,81 до 9,93 %.

Результаты экспериментального исследования растворимости тротила в сверхкритическом диоксиде углерода описаны в соответствии с моделью, широко апробированной в работах [10—13, 18] и позволяющей описывать растворимость низкокипящих и несжимаемых веществ в СК флюидных средах. Согласно этой модели

$$\ln(y) = \ln(P_v/P) - \ln(\Phi_2) + PV_m/RT,$$

где  $y$  — мольная доля растворенного вещества в насыщенном растворе;  $T$  — температура;  $P_v$  — давление насыщенных паров растворяемого вещества при температуре  $T$ ;  $P$  — давление в системе;  $\Phi_2$  — коэффициент летучести растворяемого вещества во флюиде;  $V_m$  — приведенный мольный объем чистого растворяемого вещества;  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Критические параметры СО<sub>2</sub> взяты из [19]. Поскольку в литературных источниках отсутствуют достоверные данные по критическим параметрам и давлению насыщенных паров тротила, значения этих величин могут быть установлены с использованием различных расчетных методик. В данной работе для определения критических параметров тротила выбран метод Дорна [20] и получены следующие величины:

$$T_{kp} = 783,01 \text{ К}; P_{kp} = 3,01 \text{ МПа}; w = 0,669.$$

В дополнение к коэффициенту бинарного взаимодействия, в качестве подгоночного параметра использовано и давление насыщенных паров тротила. Целесообразность такого решения, имеющая место в некоторых случаях, обоснована в работах [13, 21]. Полученные значения коэффициентов бинарного взаимодействия и давления насыщенных паров тротила представлены в таблице 1.

Результаты описания растворимости тротила в СК-СО<sub>2</sub> приведены на рис. 5 и 6.

***Растворимости тротила и его экстракционное извлечение из жестких сгорающих картузов с использованием чистого и модифицированного сверхкритического CO<sub>2</sub>***

**Таблица 1**

**Значения коэффициентов бинарного взаимодействия  $m_{ij}$  и давления насыщенных паров тротила, использованные для описания растворимости, и погрешность в описании растворимости**

Температура, К	$m_{21}$	$P_{\text{паров}}, \text{Па}$	Погрешность описания, %
308,15	0,24	0,0005	7,3
313,15	0,31	0,003	5,4
318,15	0,45	0,041	4,0
323,15	0,54	0,18	7,5
328,15	0,62	0,65	5,0
333,15	0,6	0,97	8,1

Литературные данные [14]			
308,15	0,26	0,0014	3,6
323,15	0,45	0,08	1,5

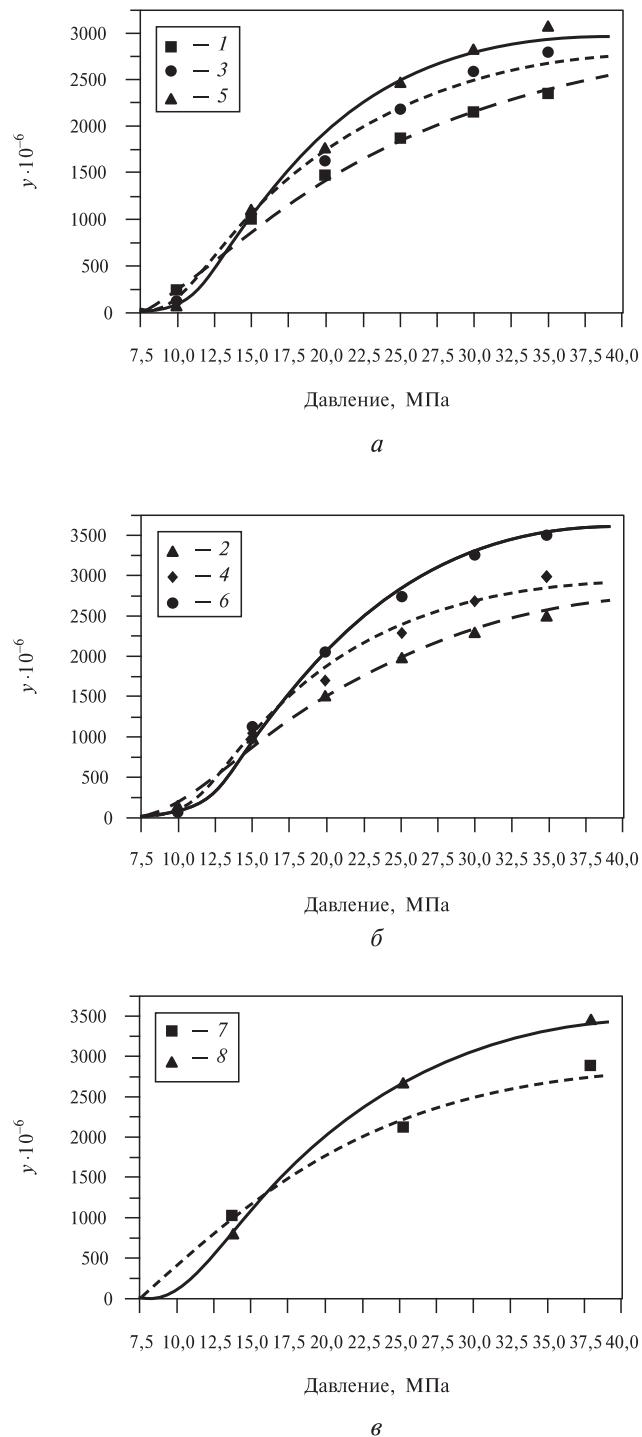
308,15 К				
Сорасторитель <sup>1</sup>	$m_{21}$	$m_{23}$	$P_{\text{паров}}, \text{Па}$	Погрешность описания
Этанол	0,27	2,66	0,0003	4,8
Ацетон	0,31	2,6	0,0012	6,15

<sup>1</sup> Концентрация сорасторителя 2,5 % масс., расход СК-СО<sub>2</sub> 0,5 г/мин.

Кинетика экстракционного извлечения тротила из образцов ЖСК с использованием чистого и модифицированного СК-СО<sub>2</sub> исследована при температурах 313,15, 323,15 и 333,15 К, давлениях 10, 20 и 30 МПа и расходе экстрагента 0,5 г/мин и описана с использованием модели, представленной в работе [22]. Эта модель предполагает, что на поверхности обрабатываемой матрицы устанавливается динамическое равновесие (точнее — квазистационарное состояние), которое определяется двумя процессами — внутренней диффузией и равновесной десорбцией и характеризуется безразмерным параметром  $h$ . Моделирование осуществляется с использованием экспериментально полученного коэффициента массопереноса  $k_f$ . В основе модели [22] лежат следующие предположения и допущения:

- 1) система состоит из двух фаз: (а) твердая фаза, из которой экстрагируется в данном случае тротил, и (б) СК флюидная фаза с растворенным в ней тротилом;
- 2) предполагается линейная зависимость между концентрациями растворяющего вещества в твердой и флюидной фазах;
- 3) расход, плотность и вязкость СК флюидной фазы в процессе считаются постоянными; перепады давления и градиенты температуры считаются пренебрежимо малыми;
- 4) растворяемое вещество растворяется во флюидном растворителе без остатка.

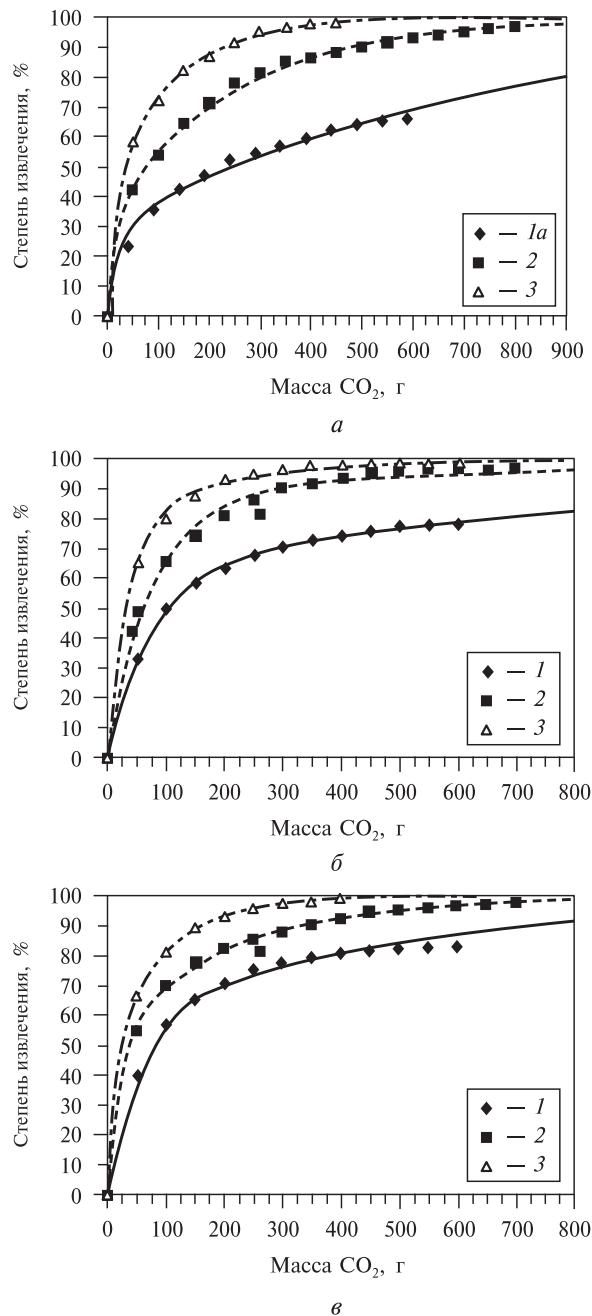
Авторами разработанной модели [22] в открытом доступе представлена компьютерная программа, написанная на базе программного пакета MATLAB, позволяющая описывать процесс экстракции, осуществленный на лабораторном уровне, и масштабировать полученные результаты до промышленных объемов.



**Рис. 6.** Зависимость мольной доли ( $y$ ) тротила в насыщенном растворе в СК- $\text{CO}_2$  от давления (точки — эксперимент, линии — описание соответствующего эксперимента):  
 1 — 308,15 K; 2 — 313,15 K; 3 — 318,15 K; 4 — 323,15 K; 5 — 328,15 K; 6 — 333,15 K; 7 — 308,15 K [14]; 8 — 323,15 K [14]

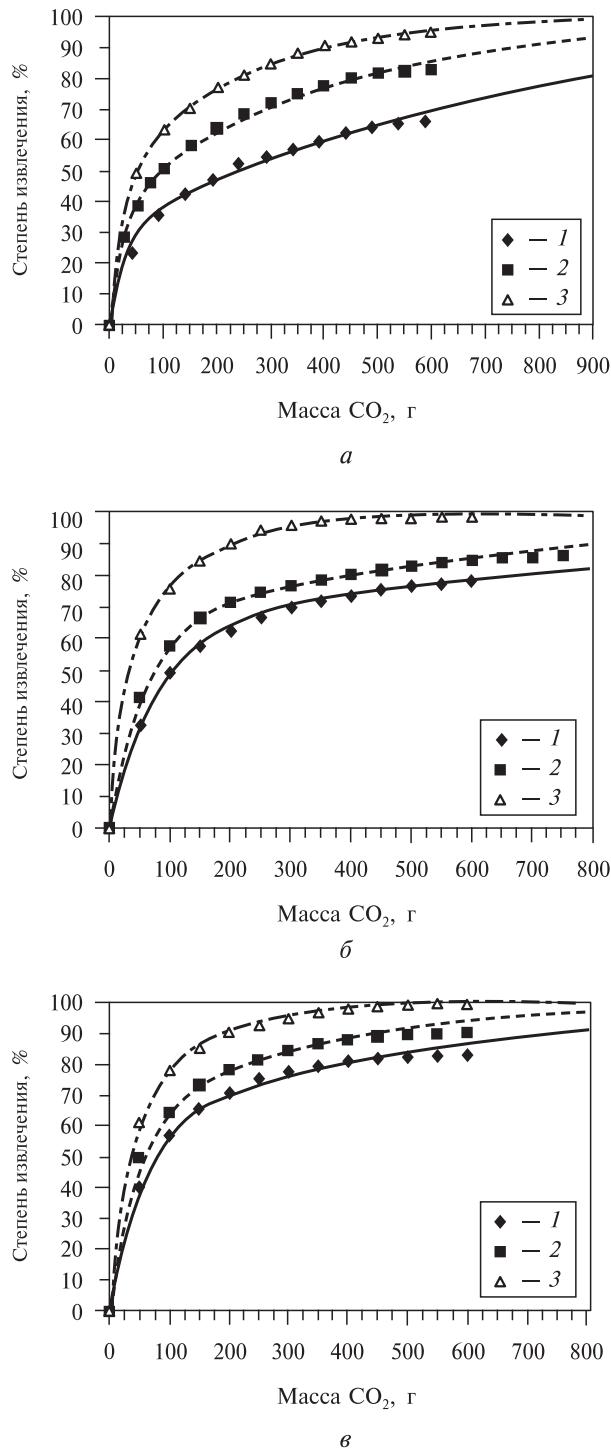
**Растворимости тротила и его экстракционное извлечение из жестких сгорающих картузов с использованием чистого и модифицированного сверхкритического  $\text{CO}_2$**

Результаты экспериментального исследования кинетики экстракционного извлечения тротила из образцов ЖСК с использованием чистого и модифицированного СК- $\text{CO}_2$  и их описания представлены на рис. 7 и 8. Из рисунков видно,



**Рис. 7.** Зависимость степени извлечения тротила из образцов ЖСК от массы прошедшего через экстрактор чистого СК- $\text{CO}_2$  (точки — эксперимент, линии — описание соответствующего эксперимента):

*a* — 313,15 К, *б* — 323,15 К, *в* — 333,15 К, *Ia* — 10,7 МПа, *I* — 10 МПа, *3* — 30 МПа



**Рис. 8.** Кинетика экстракционного извлечения тротила из образцов ЖСК с использованием модифицированного СК- $\text{CO}_2$  ( $P = 10 \text{ МПа}$ ):

*a* —  $T = 313,15 \text{ K}$ , *b* —  $T = 323,15 \text{ K}$ , *c* —  $T = 333,15 \text{ K}$ , 1 — чистый  $\text{CO}_2$ , 2 —  $\text{CO}_2$ +этанол, 3 —  $\text{CO}_2$ +ацетон, линии — описание соответствующего эксперимента

Таблица 2

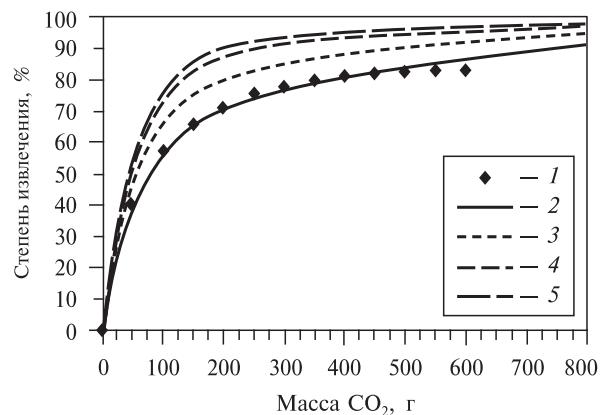
**Параметры модели процесса экстракционного извлечения тротила из ЖСК с помощью чистого и модифицированного (2,5 % масс. сорасторителя) СК- $\text{CO}_2$**

T, K	10 МПа			20 МПа, чистый $\text{CO}_2$	30 МПа, чистый $\text{CO}_2$
	Чистый $\text{CO}_2$	$\text{CO}_2 + \text{этанол}$	$\text{CO}_2 + \text{ацетон}$		
$k_f, \text{мин}^{-1}$					
313,15	0,0174	0,0167	0,0198	0,0334	0,0461
323,15	0,0056	0,0070	0,0228	0,0052	0,0097
333,15	0,0069	0,0085	0,0124	0,0182	0,0359
$h$					
313,15	258,05	129,93	84,41	145,93	102,16
323,15	155,50	81,47	44,38	69,37	42,14
333,15	79,57	49,34	27,95	74,11	59,23

что на всех изотермах при давлении 10 МПа эффективность процесса экстракции достаточно низка и для достижения 100 % извлечения тротила необходимо большое количество экстрагента. С ростом давления эффективность процесса экстракции закономерно увеличивается, и количество экстрагента, необходимое для полного извлечения целевого компонента из исследуемых образцов, снижается.

Добавление всего лишь 2,5 % масс. модификатора позволяет сделать процесс существенно более эффективным. Например, в случае ацетона 100 % тротила извлекается из образца при 323,15 К и 10 МПа; без модификатора для этого требуется повышение давления до 30 МПа.

Параметры модели ( $k_f$  и  $h$ ), рассчитанные при описании процесса экстракции, представлены в таблице 2. Несмотря на то, что эти величины получены симплекс-методом в рамках пакета MATLAB и, по словам авторов [22], не всегда имеют ясный физический смысл, они позволяют оценить тенденции изменения интенсивности экстракции, в том числе при варьировании таких параметров, как линейная скорость потока СК экстрагента и степень заполнения экстракционной ячейки исходным сырьем. Например, при описании процесса экстракции при температуре 333,15 К и давлении 10 МПа получены следующие значения параметров модели:  $k_f = 0,0069 \text{ мин}^{-1}$ ,  $h = 79,57$ . Согласно модели увеличение скорости потока от 0,26 до 0,5 см/мин и далее — до 1,0—1,5 см/мин при сохранении рассчитанных значений  $k_f$  и  $h$  приводит к интенсификации процесса экстракции (рис. 9). В силу инструментальных ограничений использованного в



**Рис. 9.** Зависимость степени извлечения тротила из образцов ЖСК от линейной скорости потока чистого СК- $\text{CO}_2$  при 333,15 К и 10 МПа:  
1 — экспериментальные данные; 2, 3, 4 и 5 — описание экстракции при скоростях потока 0,26, 0,5, 1 и 1,5 см/мин соответственно

настоящей работе оборудования экспериментального подтверждения эта тенденция в данной работе не получила. Авторами [22] получено подтверждение ее применимости для описания поведения другой системы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Получены новые экспериментальные данные по растворимости тротила в чистом и модифицированном ацетоном и этанолом сверхкритическом диоксиде углерода при температурах 308,15–333,15 К и давлениях 10–35 МПа.

Экспериментальные данные описаны с использованием уравнения состояния Пенга — Робинсона. Использование давления насыщенных паров в качестве второго подгоночного параметра в алгоритме описания обеспечивает приемлемую погрешность описания (5,81–9,93 %).

Сделанные оценки показывают, что при 313,15 К и 20 МПа может быть достигнуто полное извлечение тротила из образца ЖСК с использованием СК-СО<sub>2</sub>. При более низких температурах и давлениях полное извлечение может быть достигнуто при прохождении через образец существенно большего количества экстрагента, что делает процесс экономически неоправданным. Разработанная модель экстракционного процесса позволяет проводить его масштабирование на промышленные объемы.

Полученные в данной работе результаты создают предпосылки для создания технологии, альтернативной сжиганию, используемому в настоящем при утилизации тротилсодержащих изделий.

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Казанский государственный технологический университет» при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (соглашение № 14.574.21.0085; уникальный идентификатор проекта RFMEFI57414 X0085) и гранта РНФ 14-19-00749.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Зарядный картуз. Энциклопедия военных и морских наук / Под ред. генерал-лейтенанта Г.А. Леера. СПб.: Типография Безобразова и комп., 1888. Т. 3. 596 с.
2. Енейкина Т.А., Солдатов С.В., Гатина Р.Ф., Михайлов Ю.М. Боеприпасы и спецхимия. 2014. № 4. С. 99.
3. Советская военная энциклопедия / Под ред. Н.В. Огаркова. М.: Воениздат, 1979. Т. 4. 654 с.
4. Мадякин В.Ф., Енейкина Т.А., Осипова А.Ю., Солдатов С.В., Игнатьева С.Ю., Гатина Р.Ф. Бутлеровские сообщения. 2015. Т. 44. № 11. С. 159.
5. Патент РФ № 2501775 (2013).
6. Соколов Э.М., Антипов В.В., Антонова Е.В., Бренер В.А., Воротилин М.С., Жабин А.Б., Каляжинский Г.В., Макаровец Н.А., Пушкирев А.Е., Сладков В.Ю., Трегубов В.И., Чуков А.Н. Вопросы утилизации боеприпасов. Тула: ТулГУ, 2001. 328 с.
7. Бреннер В.А., Воротилин М.С., Головин К.А., Денежкин Г.А., Каляжинский Г.В., Кирюшкин И.Н., Климов С.А., Макаровец Н.А., Пушкирев А.Е., Сазонов Д.Ю., Сладков В.Ю., Соколов Э.М., Трегубов В.И., Чуков А.Н. Некоторые актуальные вопросы перспективных направлений утилизации боеприпасов. Тула: ГУИПП «Тульский полиграфист», 2005. 252 с.
8. Алешичева Л.И., Воротилин М.С., Кирюшкин И.Н., Сладков В.Ю., Чуков А.Н. Физические аспекты утилизации боеприпасов / Под ред. В.Ю. Сладкова. Тула: ГРИФ и К, 2009. 316 с.
9. Смирнов Л.А., Тиньков О.В. Конверсия. Ч. IV. Утилизация снятых с вооружения боеприпасов и твердотопливных ракет. М.: ЦНИИНТИКПК, 1996. 132 с.
10. Гумеров Ф.М., Ле Нейндр Б., Билалов Т.Р., Сагдеев А.А., Габитов Ф.Р., Харлампиidi X.Э., Федоров Г.И., Ярулин Р.С., Якушев И.А., Галлямов Р.Ф., Галимова А.Т., Саримов Н.Н.,

*Растворимости тротила и его экстракционное извлечение из жестких сгорающих картузов с использованием чистого и модифицированного сверхкритического CO<sub>2</sub>*

- Сагдеев К.А., Зарипов З.И., Ameer Abed Jaddoa, Бурганов Б.Т. Катализаторы: регенерация с использованием сверхкритического флюидного CO<sub>2</sub>-экстракционного процесса. Казань: Бриг, 2015. 264 с.
11. Bilalov T.R., Gumerov F.M. The manufacturing processes and catalyst regeneration / Thermodynamic basis of production processes and regeneration of palladium catalysts using supercritical carbon dioxide. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 153 p.
12. Gumerov F.M., Le Neindre B., Bilalov T.R., Sagdeev A.A., Gabitov F.R., Kharlampidi Kh.E., Fedorov G.I., Yarullin R.S., Yakushev I.A., Gallamov R.F., Galimova A.T., Sarimov N.N., Sagdeev K.A., Zaripov Z.I., Ameer Abed Jaddoa, Burganov B.T., Zakharov A.A. Regeneration of spent catalyst and impregnation of catalyst by supercritical fluid. New York: Nova publisher, 2016. 188 p.
13. Захаров А.А., Билалов Т.Р., Гумеров Ф.М. СКФ-ТП. 2015. Т. 10. № 2. С. 60.
14. Ashraf-Khorassani M., Taylor L.T. J. Chem. Eng. Data. 1999. Vol. 6. No. 44. P. 1254.
15. Сусоров М.А., Широков Ю.П. Химия и технология тротила. Л.: Изд-во Артиллерийской академии РККА им. Дзержинского, 1934. 136 с.
16. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
17. Зайдель А.И. Погрешность измерений физических величин. Л.: Наука, 1984. 112 с.
18. Mukhopadhyay M., Rao G.V.R. Ind. Eng. Chem. Res. 1993. No. 32. P. 922.
19. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1963. 567 с.
20. Dohrn R., Brunner G. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Supercritical Fluids. Strasburg (France), 1994. Vol. 1. P. 241.
21. Ameer Abed Jaddoa, Захаров А.А., Билалов Т.Р., Накипов Р.Р., Габитов И.Р., Зарипов З.И., Гумеров Ф.М. СКФ-ТП. 2015. Т. 10. № 4. С. 18.
22. Lucas S., Calvo M.P., García-Serna J., Palencia C., Cocero M.J. J. of Supercrit. Fluids. 2007. Vol. 41. No. 2. P. 257.

---

**SOLUBILITY OF 2,4,6-TRINITROTOLUENE AND ITS EXTRACTION  
FROM FLAMMABLE HARD CAPS WITH THE USE OF PURE  
AND MODIFIED SUPERCRITICAL CO<sub>2</sub>**

**1, 2T.R. Bilalov, 1F.M. Gumerov, 2R.F. Gatina**

*<sup>1</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education  
«Kazan National Research Technological University», Kazan, Russia*

*<sup>2</sup>Federal State Enterprise «State Research Institute of Chemical Products», Kazan, Russia*

Solubility of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) in pure and modified supercritical (SC) carbon dioxide is studied at 308.15–333.15 K and 10–35 MPa. The experimental data are described using the Peng – Robinson equation of state. The results of TNT extraction with SC-CO<sub>2</sub> from flammable hard cap samples are presented and the efficiency of this process is demonstrated.

**Key words:** supercritical carbon dioxide, 2,4,6-trinitrotoluene, solubility, dynamic mode, extraction.

---