

DOI: 10.18721/JPM.12109
УДК 662.612.3:661.487.1

КОНВЕРСИЯ ВОДЯНОГО ПАРА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ИСПАРЕННОГО РАСТВОРА ФТОРИДА ВОДОРОДА С УГЛЕРОДОМ В РЕЖИМЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

**В.В. Капустин¹, Д.С. Пашкевич¹, Д.А. Мухортов²,
В.Б. Петров², Ю.И. Алексеев³**

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Российский научный центр «Прикладная химия»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

³ ООО «Новые химические продукты», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Приведены результаты лабораторного исследования конверсии водяного пара при подаче испаренного водного раствора (ИВР) фторида водорода HF и кислорода в стационарный слой гранулированного графита. Установлено, что характерное время конверсии водяного пара при контакте ИВР HF и углерода при температуре около 1500 К составляет величину порядка 10 с. Сравнение результатов эксперимента с литературными данными по высокотемпературному взаимодействию водяного пара и углерода показало, что при указанной температуре присутствие HF практически не влияет на скорость взаимодействия водяного пара с углеродом. Метод, базирующийся на высокотемпературном взаимодействии ИВР HF с углеродом, может служить основой промышленной технологии дегидратации водного раствора HF, в том числе азеотропного.

Ключевые слова: фторид водорода, плавиковая кислота, водяной газ, фильтрационное горение

Ссылка при цитировании: Капустин В.В., Пашкевич Д.С., Мухортов Д.А., Петров В.Б., Алексеев Ю.И. Конверсия водяного пара при взаимодействии испаренного раствора фторида водорода с углеродом в режиме фильтрационного горения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 1. С. 105–116. DOI: 10.18721/JPM.12109

THE WATER VAPOR CONVERSION DURING THE INTERACTION BETWEEN AN EVAPORATED HYDROGEN FLUORIDE SOLUTION AND CARBON IN THE FILTRATION COMBUSTION MODE

**V.V. Kapustin¹, D.S. Pashkevich¹, D.A. Mukhortov²,
V.B. Petrov², Yu.I. Alexeev³**

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;

² FSUE RSC «Applied Chemistry», St. Petersburg, Russian Federation;

³ «New Chemical Products» Ltd., St. Petersburg, Russian Federation

The results of laboratory studies of the water vapor conversion when an evaporized aqueous solution (EAS) of HF and oxygen is being fed into a stationary layer of granular graphite have been presented. It was established that the characteristic time for the water vapor conversion upon the contact of the EAS of HF with carbon at a temperature of about 1500 K was 10 s.

Comparison of the experimental results with the literature data on high-temperature interaction of water vapor and carbon showed that HF had little or no effect on the rate of this interaction at a temperature of about 1500 K. Our method derived from the high-temperature interaction of the EAS of HF with carbon can serve as the basis of an industrial technology for the dehydration of an aqueous solution of HF, including azeotropic one.

Keywords: hydrogen fluoride, hydrofluoric acid, water gas, filtration combustion

Citation: V.V. Kapustin, D.S. Pashkevich, D.A. Mukhortov, V.B. Petrov, Yu.I. Alexeev, The water vapor conversion during the interaction between an evaporated hydrogen fluoride solution and carbon in the filtration combustion mode, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (1) (2019) 105–116. DOI: 10.18721/JPM.12109

Введение

Водный раствор фторида водорода HF (плавиковая кислота) является продуктом целого ряда производств; он, например, образуется при переработке гидролизом обедненного гексафторида урана UF₆ [1, 2].

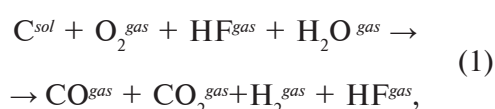
В то же время в промышленности в качестве фторирующего агента используют в основном безводный фторид водорода (БФВ) [3, 4], содержание воды в котором должно быть не выше 0,06 % [5]. Поэтому разработка технологий получения безводного фторида водорода из его водных растворов является актуальной задачей.

Обычно БФВ получают из его водного раствора ректификацией [5]. Однако этот раствор при содержании в нем фторида водорода примерно 35 – 40 % является азеотропным [6], и применение обычной ректификации не позволяет разделить смесь на индивидуальные компоненты. В этом случае при любом составе исходной смеси, подвергаемой ректификации, в качестве одного из компонентов будет выступать азеотроп. Таким образом, извлечь полностью фторид водорода из его водного раствора путем ректификации оказывается невозможным.

Известны работы по дегидратации плавиковой кислоты фторидом натрия [7] и концентрированной серной кислотой [8]. Первый метод в настоящее время не нашел промышленного применения. Во втором в качестве побочного продукта образуется 75 %-я серная кислота в количестве около 30 кг на 1 кг БФВ, поэтому выбор конструкционных материалов для промышленной реализации этого метода затруднителен.

В работе [9] предложен метод дегидратации водного раствора фторида водорода, в том числе азеотропного, высокотемпературным взаимодействием водяных паров с углеродом в режиме фильтрационного

горения по схеме:



где верхние индексы *sol* и *gas* означают твердую и газовую фазы веществ.

С помощью термодинамических расчетов и лабораторных исследований в статье [9] было показано, что при температуре выше 1000 К фторид водорода является единственным фторсодержащим веществом в системе.

Таким образом, была показана принципиальная возможность проведения процесса (1), когда фторид водорода остается инертным по отношению к другим компонентам системы, а водяной пар взаимодействует с углеродом с образованием водорода H₂^{gas} и монооксида углерода CO^{gas}.

Взаимодействие водяного пара с углеродом хорошо изучено в теории газификации твердых топлив. В частности, в работе [10] было показано, что характерное время взаимодействия водяного пара с углеродом различных марок, при температуре 1500 – 1600 К, составляет несколько секунд.

Однако данных о скорости реакции взаимодействия водяного пара с углеродом в присутствии фторида водорода в литературе не обнаружено. При этом известно, что фторид водорода как полярное вещество (его дипольный момент равен 1,88 Д), оказывает на многие химические процессы как каталитическое, так и ингибирующее действие [4].

Цель настоящей статьи – определить глубину конверсии водяного пара при высокотемпературном взаимодействии испаренного водного раствора фторида водорода со слоем гранулированного графита при подаче в слой кислорода.

Таблица 1

Гранулометрический состав исходного графита

Размер ячейки сита, мм	10	7	5	2,0	1,4	0,40	0,25
Массовое содержание графита в засыпке, %	0,0	0,8	20,0	63,7	12,6	2,9	0,0

Характеристика исходных веществ

Для экспериментального исследования в лабораторных условиях использовали графит искусственный измельченный ГИИ-А (ТУ 1916-109-71-2000) с насыпной массой 840 кг/м^3 и содержанием основного вещества не менее 99 %; графит имел зольность не более 1 %, содержание влаги и серы – не более 1,0 и 0,05 % соответственно. Гранулометрический состав засыпки приведен в табл. 1. Состав примесей определяли с помощью эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой ICPE-9000 и инфракрасного Фурье-спектрометра FTIR-8400S. Результаты исследования позволяют заключить, что основными примесями в исходном графите были силикаты кальция и железа.

С помощью выщелачивания графита 0,4 %-м гидроксидом натрия было установлено, что кислотная составляющая в исходном графите отсутствовала.

В данной работе использовали водные растворы фторида водорода с массовым содержанием последнего 40 и 72 %, так как эти растворы образуются в ряде технологических процессов [1, 2].

Лабораторная установка и методика проведения эксперимента

Для проведения экспериментальных исследований по высокотемпературному взаимодействию водяного пара и углерода в присутствии кислорода и фторида водорода была создана лабораторная установка, схема которой представлена на рис. 1.

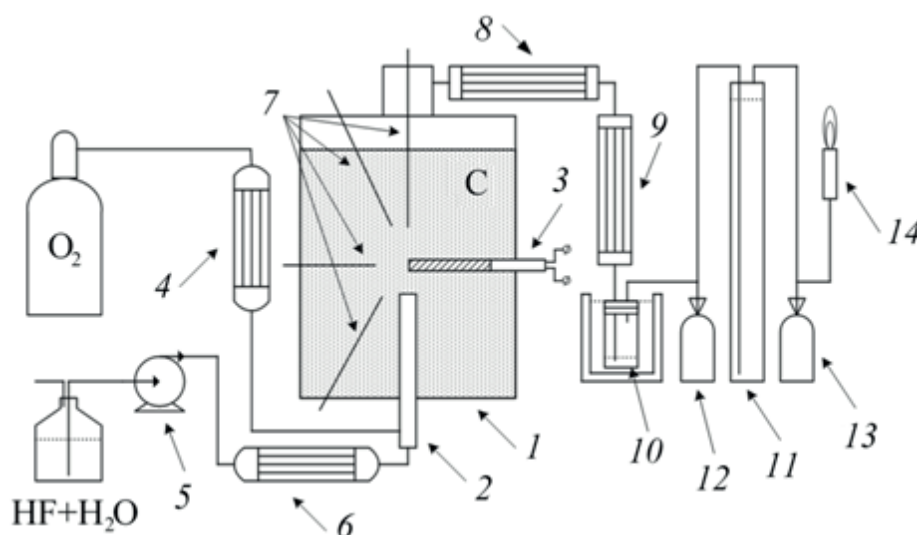


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

1 – реактор; 2 – двухкомпонентная форсунка; 3 – съемный электронагреватель; 4 – теплообменник для нагрева O_2 ; 5 – перистальтический насос; 6 – теплообменник для испарения и перегрева водного раствора HF; 7 – термопары; 8, 9 – никелевые теплообменники; 10 – сборник кислоты; 11 – щелочной абсорбер; 12, 13 – никелевые ампулы; 14 – устройство для сжигания H_2 и CO в кислороде воздуха

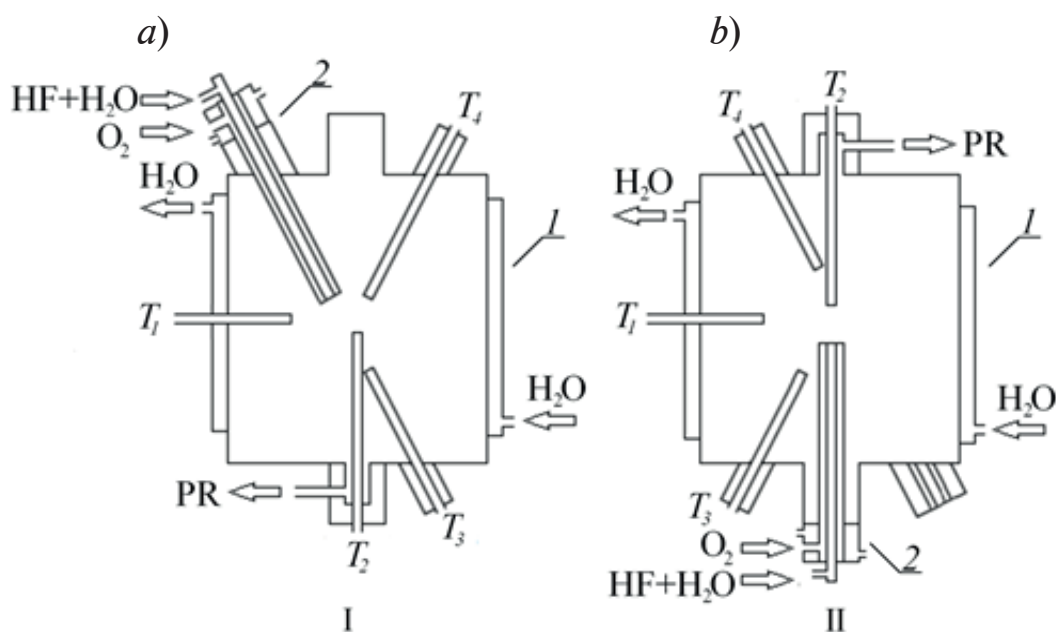


Рис. 2. Схемы двух способов установки форсунки (2) и термопар ($T_1 - T_4$) в реакторе (I); a, b – положения I и II; PR – продукты реакции

Стальной цилиндрический реактор I объемом 23 л, высотой 400 мм и внутренним диаметром 273 мм оборудован рубашкой охлаждения и системами подвода компонентов и отвода продуктов реакции. Температура теплоносителя в рубашке охлаждения составляла 370 К.

Толстостенная медная форсунка 2 диаметром 28 мм и толщиной стенки 8 мм служила для подачи кислорода в слой гранулированного углерода и испаренного водного раствора фторида водорода. Для охлаждения форсунки в верхней ее части была смонтирована рубашка охлаждения, в которую подавали воду при температуре 370 К. Опыты проводили при двух способах установки форсунки 2 в реакторе I.

В положении I (рис. 2, a) форсунка устанавливалась в боковой штуцер верхнего фланца реактора под углом в 45°, при этом срез форсунки располагался на вертикальной оси реактора. В положении II (рис. 2, b) форсунку устанавливали в центральный штуцер верхнего фланца, а сам реактор переворачивали.

Распределение температуры в области выхода газа из форсунки отслеживали с помощью хромель-алюмелевых термопар $T_1 - T_4$, установленных в никелевые чехлы диаметром 6 мм и толщиной стенки чехла 1,5 мм. В начале опыта в реактор загружали

гранулированный графит до уровня верхней крышки, при этом средняя масса засыпки углерода составляла 16 кг. Далее с помощью съемного электронагревателя 3 (см. рис. 1), установленного вблизи среза форсунки, осуществляли предварительный разогрев слоя углерода. После того, как графит вблизи форсунки прогревался до температуры 900 К, съемный электронагреватель извлекали из реактора и через форсунку подавали кислород для дальнейшего разогрева слоя углерода и поддержания температуры выше 1000 К. Для того чтобы исключить возможность конденсации паров воды и фторида водорода на внутренних поверхностях форсунки, кислород перед подачей в реактор разогревали до 500 К в теплообменнике 4 (см. рис. 1).

Затем в слой нагретого углерода вместе с кислородом подавали предварительно испаренный водный раствор фторида водорода. Дозирование раствора осуществляли с помощью перистальтического насоса 5, испарение раствора происходило в теплообменнике 6 при температуре 600 К.

С помощью термопар оценивали границы и характерные размеры области в слое графита, где температура превышала 1000 К. Отметим, что при такой температуре равновесие в реакции (1) сдвинуто вправо.

Для охлаждения газового потока продуктов реакции, на выходе из реактора были последовательно установлены никелевые теплообменники 8 и 9 (см. рис. 1), в которых поддерживали значения температуры 280 К с помощью криостата и 220 К с помощью жидкого азота, соответственно. Сконденсированную жидкость собирали в сборнике 10 (он футерован фторопластом-4), а затем ее анализировали титрованием на содержание фторида водорода и воды. Сборник также охлаждали жидким азотом до температуры 220 К.

Газовый поток после сборника нейтрализовали в щелочном абсорбере 11. Пробы для хроматографического и спектрального анализов газообразных продуктов реакции отбирали до и после абсорбера в никелевые ампулы 12 и 13 соответственно (ампулы были пассивированы фтором). В течение одного опыта пробы для газового анализа отбирали от трех до пяти раз.

Водород и монооксид углерода, образовавшиеся при высокотемпературном взаимодействии углерода и водяного пара, сжигали в кислороде воздуха в устройстве 14 (см. рис. 1).

После проведения опыта реактор продували инертным газом, углеродный материал охлаждали, перемешивали и отбирали

пробу. Методики анализа углерода и продуктов реакции описаны в статье [9].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Тепловое состояние реактора. Объемный расход кислорода в опытах был выбран максимально возможным. При этом налагалось требование, чтобы при нем не происходило псевдооживления слоя графита. Это значение расхода составляло $90 \text{ н.см}^3/\text{с}$.

Изменение расхода испаренного водного раствора фторида водорода находилось в диапазоне $5 - 85 \text{ мг/с}$.

Измерения показали, что температура графита в слое вблизи выхода газовых потоков из форсунки превышала 1400 К, что достаточно для протекания реакции получения водяного газа. При этом было необходимо учитывать, что никелевые трубки, в которых установлены термопары, искажали температурное поле за счет своих тепловых характеристик (теплоемкость и теплопроводность); вследствие этого измеряемые значения температуры оказывались ниже фактических.

На рис. 3 приведены экспериментальные распределения температуры, зафиксированные термопарами для двух вариантов установки форсунки (см. рис. 2).

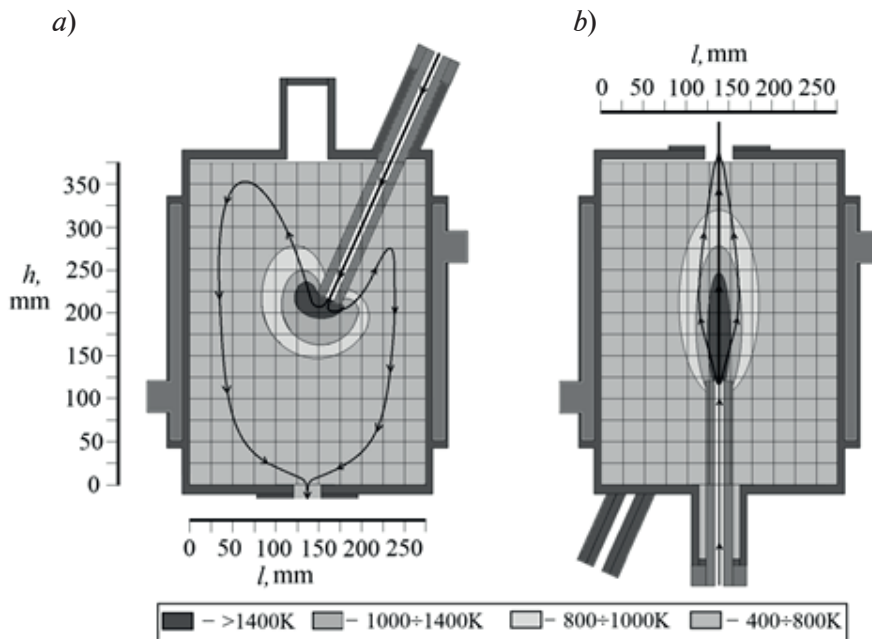


Рис. 3. Экспериментальные распределения температуры в реакторе для положений I (a) и II (b) форсунки (см. рис. 2); показаны также предполагаемые линии тока газа

В положении I в реакторе формировалась асимметричная высокотемпературная зона, форма которой была близка к шарообразной. Асимметрия высокотемпературной зоны связана с взаимодействием вынужденной и естественной конвекции при формировании газового потока сквозь слой углерода. Вследствие вынужденной конвекции формировался поток газа от выхода из форсунки к выходу из реактора; он был направлен сверху вниз. В результате же естественной конвекции формировался поток газа ($T \approx 1300$ К), который двигался от выхода из форсунки вверх, достигал полости между верхним уровнем слоя углерода и верхней крышкой реактора ($T \approx 400$ К) и опускался вдоль стенок реактора к выходу из него.

На формирование описанной структуры течения влияла также зависимость вязкости газа от температуры: с ростом температуры вязкость газа увеличивается, а следовательно, возрастает и гидравлическое сопротивление газа в высокотемпературной области. Это заставляет поток газа огибать высокотемпературную область.

В положении форсунки II в реакторе формировалась симметричная высокотемпературная область в виде эллипсоида, вытянутого в вертикальном направлении. При этом составляющие вынужденной и естественной конвекции были сонаправлены к выходу из реактора.

Характерный размер зоны с температурой выше 1000 К в положении I составлял примерно 7 – 8 см, а в положении II формировалась область с характерными значениями высоты 13 – 15 см и ширины 5 – 6 см.

При одном и том же значении расхода газообразных компонентов время пребывания водяного пара в высокотемпературной ($T > 1000$ К) зоне в положении II было выше примерно на 60 %, чем в положении I.

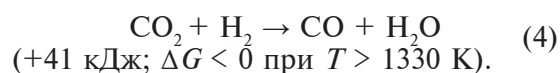
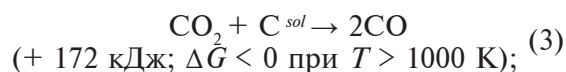
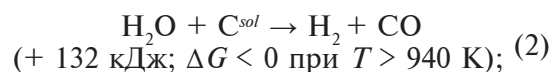
В высокотемпературной реакционной области можно выделить три зоны. Первая – кислородная зона – занимает область от места выхода газа из форсунки до поверхности, где концентрация кислорода становится равной нулю. Вторая – зона взаимодействия водяного пара и углерода – охватывает область от границы кислородной зоны до поверхности, где температура снижается до 940 К. Остальную часть реакционной области занимает третья зона

– область образования вторичной воды, где температура ниже 940 К.

В кислородной зоне происходит высокоэкзотермическая реакция взаимодействия углерода с кислородом [11]. Существенного изменения содержания воды в кислородной зоне практически не происходит, так как водород, образующийся при ее взаимодействии с углеродом, полностью окисляется кислородом.

Оценку длины кислородной зоны мы делали в соответствии с рекомендациями, предложенными в работе [12]. Для расхода кислорода 90 н.см³/с и гранулометрического состава углеродного материала, приведенного в табл. 1, характерный размер кислородной зоны составил 1,5 см.

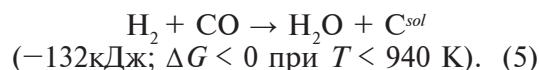
За кислородной следует восстановительная зона, в которой происходит взаимодействие паров воды с углеродом и образуются водород и монооксид углерода при температуре свыше 940 К. Кроме того, в этой зоне возможно протекание следующих эндотермических реакций:



Здесь ΔG – изменение энергии Гиббса.

Для определения области изменения температуры, в которой равновесие в реакциях (2) – (4) (а также в реакции (5), приведенной ниже) сдвинуто вправо, мы рассчитали изменение энергии Гиббса в зависимости от температуры.

В зоне образования вторичной воды температура ниже 940 К. При этом условия реакция взаимодействия водяного пара с углеродом прекращается, но протекает обратная реакция взаимодействия водорода с монооксидом углерода и образуется вторичная вода:



Таким образом, характерный размер кислородной зоны оказывается примерно на порядок меньше такового для высокотемпературной (выше 1000 К) зоны в слое графита. В восстановительной же зоне целесообразно поддерживать температуру в



диапазоне 1000 – 1300 К, при которой водяной пар взаимодействует с углеродом, а реакция (4) термодинамически запрещена ($\Delta G < 0$).

Конверсия водяного пара в зависимости от массового расхода испаренного водного раствора фторида водорода. Одним из параметров, определяющих эффективность предлагаемого метода получения фторида водорода, является конверсия водяного пара при высокотемпературном контакте с углеродом.

Конверсию водяного пара при заданном расходе водного раствора фторида водорода определяли двумя способами: по составу газообразных продуктов на выходе из реактора и по количеству воды, собранной в приемной емкости I_0 (см. рис. 1).

Измерения состава газовой фазы на выходе из реактора позволяют рассчитать конверсию водяного пара на основе материального баланса кислорода и водорода, поступающих в реактор в виде водяного пара и молекулярного кислорода и покидающих реактор в виде молекулярного водорода и в составе оксидов углерода.

Расчет конверсии водяного пара по газообразным продуктам реакции K_{gas} произво-

дили по следующей формуле:

$$K_{gas} = \frac{W_{O_2}}{W_{H_2O}} \times \frac{c_{H_2}}{\frac{c_{CO} - c_{H_2}}{2} + c_{CO_2} + c_{O_2}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где W , мг/с, – расход соответствующих компонентов на входе в реактор; c , об.%, – концентрация соответствующих веществ в газовом потоке на выходе из реактора после конденсации воды и фторида водорода.

В табл. 2 приведен характерный состав газовой фазы после конденсатора фтористого водорода I_0 (см. рис. 1). Конверсию водяного пара по жидкой фазе K_{flu} определяли как отношение массы воды, собранной в приемной емкости I_0 (см. рис. 1), к массе водяного пара, поданной в реактор в составе водного раствора фторида водорода.

На рис. 4 приведены значения конверсии водяного пара K_{gas} и K_{flu} в зависимости от расхода водного раствора фторида водорода для двух концентраций фторида водорода и двух способов установки форсунки в реакторе.

Таблица 2
Характерный состав газообразных
продуктов процесса после конденсатора фторида
водорода

Продукт	c , об.%	Способ определения
CF ₄	–	Газовая хроматография
CO	70	
CO ₂	20	
H ₂	10	
O ₂	0,5	
CH ₄	0,1	
(HF) _{<i>n</i>}	0,1 при $n = 4$	Потенциометрия
COF ₂	–	ИКФС

Примечания: точность определения характерной концентрации c составляла 10^{-2} об.%; ИКФС – инфракрасная Фурье-спектроскопия

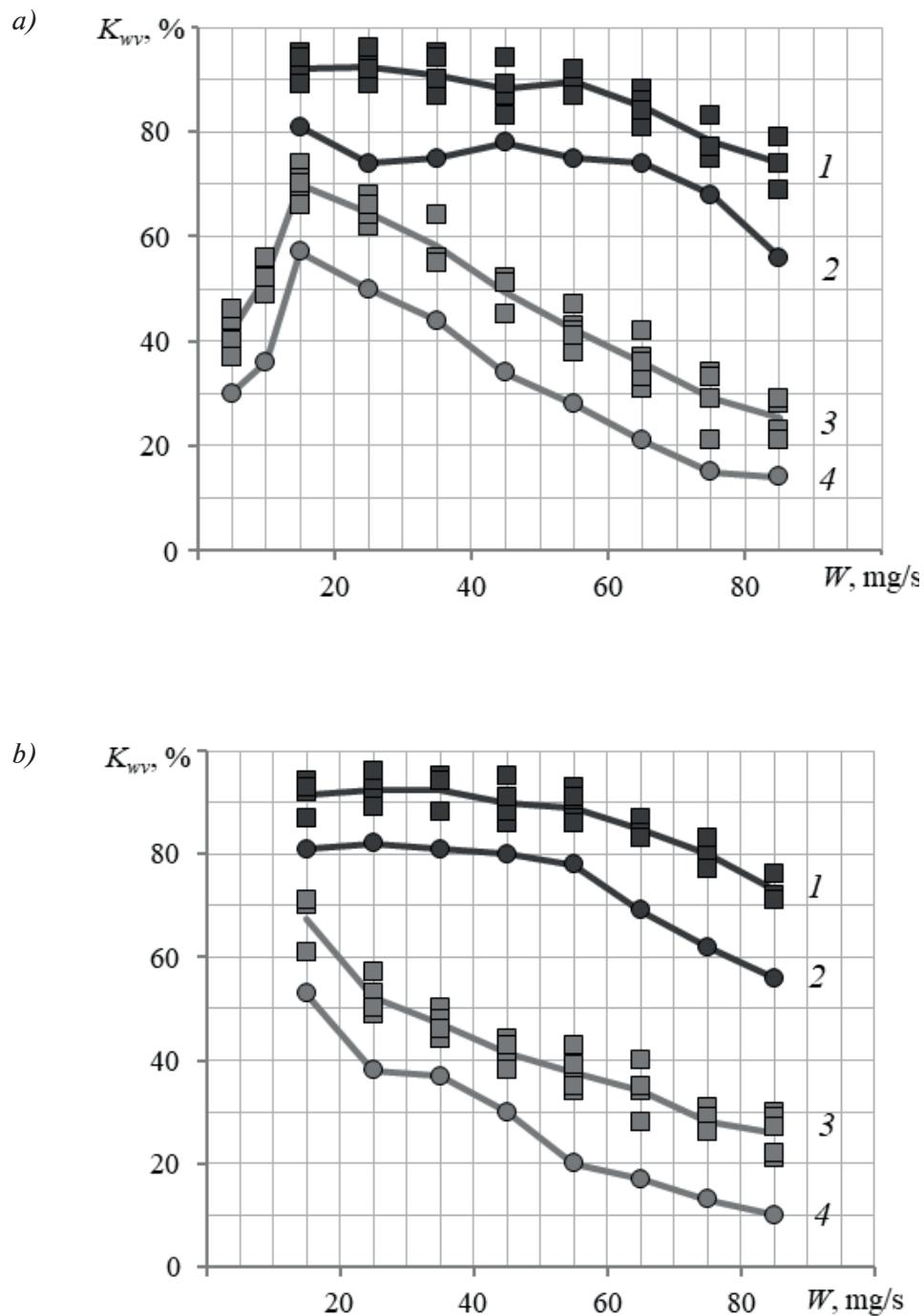


Рис. 4. Зависимости конверсии водяного пара $K_{wv} - K_{gas}$ (кривые 1, 3) и K_{flu} (2, 4) от расхода водного раствора HF при контакте этого испаренного раствора с высокотемпературным слоем углерода; содержание HF в растворе составляло 40% (a) и 72 % (b);

приведены данные для положений форсунки I (3, 4) и II (1, 2) (см. рис. 2)

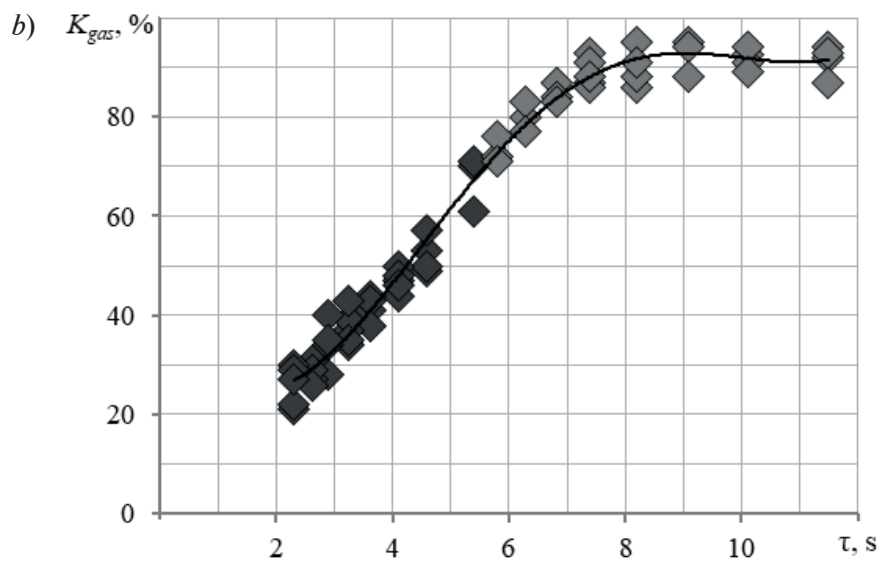
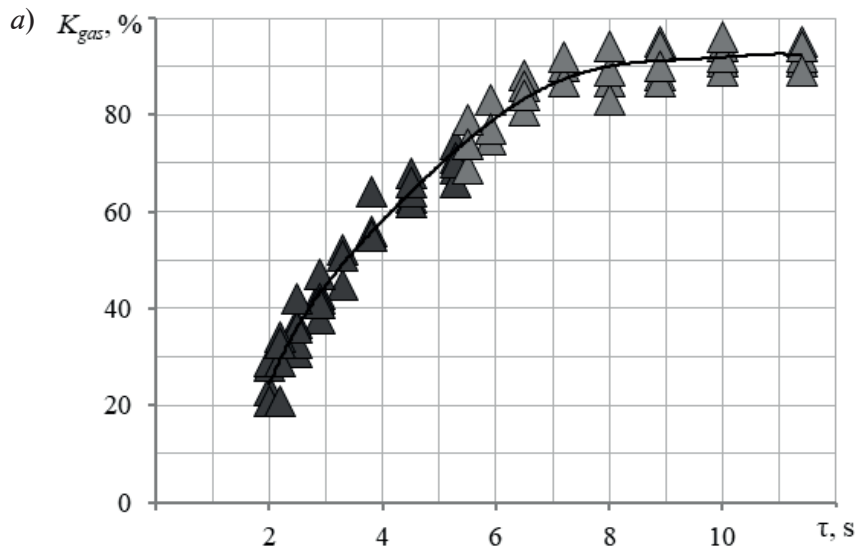


Рис. 5. Зависимости конверсии K_{gas} водяного пара (wv) при подаче испаренного водного раствора HF в высокотемпературный слой графита от времени пребывания wv вне кислородной зоны, в слое с температурой свыше 1000 К; содержание HF в растворе составляло 40% (a) и 72% (b);

приведены данные для положений форсунки I (черные символы) и II (светло-серые символы) (см. рис. 2)

Конверсия водяного пара при изменении расхода водного раствора фторида водорода от 5 до 90 мг/с меняется от 10 до 80 – 90%, проходя через максимум.

Снижение конверсии водяного пара с увеличением расхода раствора от 20 до 90 мг/с связано с сокращением времени пребывания водяного пара в высокотемпературной зоне и снижением температуры слоя углерода в связи с его охлаждением потоками водяного пара и фторида водорода, а также с протеканием эндотермической реакции образования водяного газа.

Рост значения конверсии при увеличении расхода от 5 до 20 мг/с, вероятно, связан с сокращением времени пребывания продуктов реакции в зоне образования вторичной воды.

Конверсия водяного пара K_{gas} во всех опытах выше, чем конверсия K_{flu} , в среднем на 14 %. Вероятно, это связано с уносом мелкодисперсных капель воды из сборника 10.

Значения глубины конверсии водяного пара при работе с кислотой, содержащей фторид водорода в концентрации 40 и 72 %, близки между собой.

На конверсию оказывает существенное влияние способ установки форсунки. При осесимметричной установке (в положение II) конверсия водяного пара выше примерно на 40%. Вероятно, что это связано с большим временем пребывания потока в высокотемпературной зоне.

Конверсия водяного пара в зависимости от времени его пребывания в высокотемпературной области. Указанное время пребывания в зоне с температурой выше 1000 К приближенно оценивали по расходу водного раствора фторида водорода и конфигурации высокотемпературной зоны с учетом расхода кислорода. При этом полагали, что реакция образования водяного газа протекает вне кислородной зоны. Результаты обработки экспериментальных данных приведены на рис. 5. Полученные зависимости

глубины конверсии от времени контакта углерода с водяным паром в высокотемпературной бескислородной зоне позволяют сделать вывод о том, что реакция (1) проходит практически полностью при времени контакта примерно 7 – 10 с и это время не зависит от исходной концентрации плавиковой кислоты.

Полученные значения времени контакта, при которых обеспечена 90 %-я конверсия водяного пара, хорошо согласуются с данными работы [10], в которой рассматривалось взаимодействие водяного пара с различными марками графита в отсутствие фторида водорода. Кроме того, было показано, что концентрация фторида водорода в его исходном растворе не влияет на значение конверсии водяного пара.

На основе проведенного анализа данных можно сделать вывод, что фторид водорода практически не оказывает влияния на скорость высокотемпературного взаимодействия водяного пара с графитом при температуре свыше 1000 К.

Заключение

На основе проведенного лабораторного экспериментального исследования установлено следующее.

При взаимодействии водяного пара с углеродом при температуре свыше 1000 К присутствие фторида водорода практически не оказывает влияния на скорость этой реакции.

Характерное время контакта водяного пара и неподвижного слоя графита при температуре свыше 1000 К в присутствии фторида водорода, при котором достигается 90%-я конверсия водяного пара, составляет величину порядка 10 с.

Метод высокотемпературного взаимодействия водяного пара с углеродом может стать основой промышленной технологии дегидратации водного раствора фторида водорода, в том числе азеотропного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borgard J.M., Herbelet F., Gwinner B. Recycling hydrofluoric acid in the nuclear industry: The overazeotropic flash process (OFAF) // Journal of Fluorine Chemistry. 2016. Vol. 185. May. Pp. 17–23.
2. Morel B., Duperret B. Uranium and fluorine cycles in the nuclear industry // Journal of Fluorine Chemistry. 2009. Vol. 130. No. 1. Pp. 7–10.
3. Тураев Н.С., Жерин И.И. Химия и технология урана. М.: ЦНИИ Атоминформ, 2005. 407 с.
4. Максимов Б.Н., Барабанов В.Г., Серушкин И.Л., Зотиков В.С.,



Семерикова И.А., Степанов В.П., Сагайлакова Н.Г., Каурова Г.И. Промышленные фторорганические продукты. Ленинград: Химия, 1996. 544 с.

5. Зайцев В.А., Новиков А.А., Родин В.И. Производство фтористых соединений при переработке фосфатного сырья. М.: Химия, 1982. 248 с.

6. Коростелев П.П. Реактивы для технического анализа. М.: Металлургия, 1988. 384 с.

7. Троян Н. В., Рябин В. А., Тимошенко А.И., Шубин А.С., Коробицын А.С., Павлович И.В. Кинетика образования бифторида натрия // Цветные металлы. 1985. № 8. С. 71–73.

8. Dahlke T., Ruffiner O., Cant R. Production of HF from H_2SiF_6 // Procedia Engineering.

2016. Vol. 138. Pp. 231–239.

9. Пашкевич Д.С., Алексеев Ю.И., Петров В.Б., Мухортов Д.А., Камбур П.С., Капустин В.В., Марков С.А., Ласкин Б.М., Макотченко В.Г. Стабильность фторида водорода в высокотемпературной зоне восстановления воды углеродом // Химическая промышленность. Т. 92. № 5. 2015. С. 211–220.

10. Федосеев С.Д., Чернышев А.Б. Полукоксование и газификация твердого топлива. М.: Гостоптехиздат, 1960. 327 с.

11. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива. М: Изд-во АН СССР, 1958. 601 с.

12. Михеев В.П. Газовое топливо и его сжигание. Ленинград: Недра, 1966. 328 с.

Статья поступила в редакцию 01.10.2018, принята к публикации 29.12.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАПУСТИН Валентин Валерьевич – аспирант кафедры гидродинамики, горения и теплообмена Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
Valentin.Kapustin.2014@yandex.ru

ПАШКЕВИЧ Дмитрий Станиславович – доктор технических наук, профессор кафедры гидродинамики, горения и теплообмена Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
pashkevich-ds@yandex.ru

МУХОРТОВ Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории Российского научного центра «Прикладная химия», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Крыленко, 26А
dmukhortov@mail.ru

ПЕТРОВ Валентин Борисович – старший научный сотрудник Российского научного центра «Прикладная химия», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Крыленко, 26А
valentinpetrov46@mail.ru

АЛЕКСЕЕВ Юрий Иванович – кандидат технических наук, главный конструктор ООО «Новые химические продукты», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

191186, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 11.
alexeev-588@yandex.ru

REFERENCES

[1] J.M. Borgard, F. Herbelet, B. Gwinner, Recycling hydrofluoric acid in the nuclear industry: The overazeotropic flash process (OVAF), Journal of Fluorine Chemistry. 185 (May) (2016) 17–23.

[2] B. Morel, B. Duperret, Uranium and

fluorine cycles in the nuclear industry, Journal of Fluorine Chemistry. 130 (1) (2009) 7–10.

[3] N.S. Turayev, I.I. Zherin, Khimiya i tekhnologiya urana [Chemistry and technology of uranium], Atominform, Moscow, 2005.

- [4] **B.N. Maksimov, V.G. Barabanov, I.L. Serushkin, et al.**, Promyshlennyye ftororganicheskiye produkty [Industrial fluororganic products], Khimiya, Leningrad, 1996.
- [5] **V.A. Zaytsev, A.A. Novikov, V.I. Rodin**, Proizvodstvo ftoristykh soyedineniy pri pererabotke fosfatnogo syrya [Production of fluoride compounds in the processing of phosphate raw materials], Khimiya, Moscow, 1982.
- [6] **P.P. Korostelev**, Reaktivy dlya tekhnicheskogo analiza [Reagents for technical analysis], Metallurgiya, Moscow, 1988.
- [7] **N.V. Troyan, V.A. Ryabin, A.I. Timoshenko, et al.**, Kinetika obrazovaniya biftorida natriya [Sodium bifluoride formation kinetics] Tsvetnyye metally. 8 (1985) 71–73.
- [8] **T. Dahlke, O. Ruffiner, R. Cant**, Production of HF from H_2SiF_6 , Procedia Engineering. 138 (2016) 231–239.
- [9] **D.S. Pashkevich, Yu.I. Alekseyev, V.B. Petrov, et al.**, Stabilnost ftorida vodoroda v vysokotemperaturnoy zone vosstanovleniya vody uglerodom [Stability of hydrogen fluoride in the high-temperature zone of water reduction by carbon], Khimicheskaya promyshlennost. 92 (5) (2015) 211–220.
- [10] **S.D. Fedoseyev, A.B. Chernyshev**, Polukoksovaniye i gazifikatsiya tverdogo topliva [Semicoking and gasification of solid fuel], Gostoptekhizdat, Leningrad, 1960.
- [11] **B.V. Kantorovich**, Osnovy teorii goreniya i gazifikatsii tverdogo topliva [Fundamentals of the theory of combustion and gasification of solid fuel], SA of the USSR, Moscow, 1958.
- [12] **V.P. Mikheyev**, Gazovoye toplivo i yego szhiganiye [Gas fuel and its combustion], Nedra, Leningrad, 1966.

Received 01.10.2018, accepted 29.12.2018.

THE AUTHORS

KAPUSTIN Valentin V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
Valentin.Kapustin.2014@yandex.ru

PASHKEVICH Dmitrii S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
pashkevich-ds@yandex.ru

MUKHORTOV Dmitrii A.

FSUE RSC "Applied Chemistry"
26A Krylenko St., St. Petersburg, 193232, Russian Federation
dmukhortov@mail.ru

PETROV Valentin B.

FSUE RSC "Applied Chemistry"
26A Krylenko St., St. Petersburg, 193232, Russian Federation
valentinpetrov46@mail.ru

ALEXEEV Yury I.

«New Chemical Products» Ltd.
11 Moyka River Emb., St. Petersburg, 191186, Russian Federation
alexeev-588@yandex.ru