

03;12

## Согласование вихревого и пробоотборного потоков при дистанционном отборе газовых проб с помощью закрученной воздушной струи

© Ю.Н. Коломиец, В.В. Первухин

Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,  
Новосибирск  
E-mail: ykolom@che.nsk.su

Поступило в Редакцию 12 января 2009 г.

Предложен и исследован метод увеличения эффективности дистанционного отбора проб с помощью закрученной воздушной струи путем согласования вихревого и пробоотборного потоков. Показано, что в условиях согласования потоков (отношение вихревого и пробоотборного потоков равно 1.3) образуется обратное течение с вихревым ядром минимального диаметра, чем обеспечиваются минимальные потери пробы при сохранении высокого разрежения на поверхности объекта.

PACS: 07.88.+y, 06.60.Ei

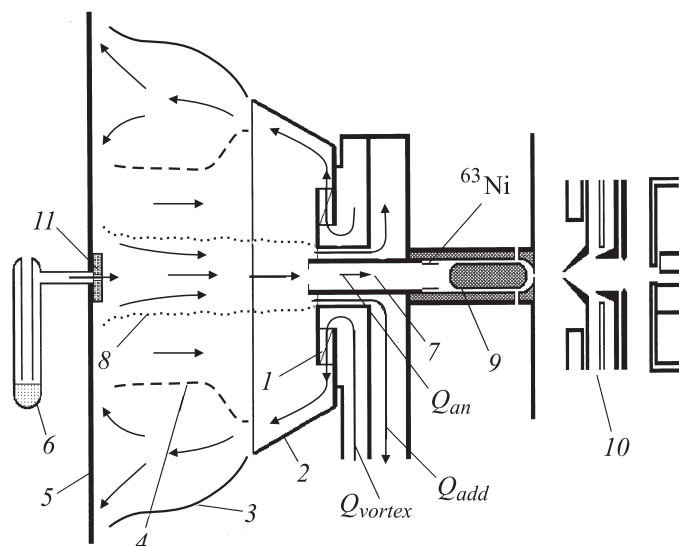
В практике газового анализа имеется целый ряд случаев, когда требуется оперативно производить бесконтактный, дистанционный отбор газовых проб с поверхности, а также внутри исследуемых объектов. Самым подходящим методом пробоотбора для этого является использование закрученной воздушной струи. При высокой интенсивности крутки из-за центробежного разлета в закрученной струе статическое давление во всем ее объеме ниже атмосферного, а вблизи оси возникает обратное течение ( $Q_{cf}$ ) [1]. При обдуве объекта вихревым потоком ( $Q_{vortex}$ ) пары веществ, снимаемые с поверхности и вытесняемые изнутри объекта пониженным давлением, захватываются обратным течением и транспортируются к истоку струи, где расположен газоанализатор. Наиболее привлекательным для вихревого пробоотбора является режим, когда структура обратного течения представляет собой составной вихрь [2]: вблизи оси образуется быстро вращающееся ядро

вынужденного вихря, а остальной объем занимает свободный вихрь. Преимущества такого режима заключаются в создании повышенного разрежения на поверхности объекта при относительно небольших размерах пробоотборника и снижении потерь пробы за счет ее концентрирования радиальным течением свободного вихря в ядро.

Серьезные трудности для практического применения вихревого пробоотбора в режиме составного вихря связаны с небольшой величиной аналитического потока ( $Q_{an}$ ) у большинства существующих газоанализаторов. Это ограничивает величину вихревого потока, а соответственно и дистанцию пробоотбора, и разрежение, создаваемое на поверхности обследуемого объекта. Для преодоления этого ограничения предлагается вводить дополнительный поток, коаксиально охватывающий аналитический канал и позволяющий увеличить вихревой поток до необходимых величин без изменения его структуры [2]. Однако при этом неизвестно, насколько большими окажутся потери пробы. Особенно это важно, когда дополнительный поток много больше аналитического, и большая часть пробы может уходить из анализа вместе с дополнительным потоком, если концентрирование пробы вблизи оси струи окажется недостаточно эффективным. В известных в настоящее время предлагаемых схемах вихревых пробоотборников [3,4] вопросы, связанные с согласованием вихревого и пробоотборного потоков, не рассматривались.

Данная работа посвящена изучению эффективности дистанционного отбора пробы от обследуемого объекта в зависимости от соотношения вихревого, дополнительного и аналитического потоков. Для этого измеряли зависимость давления в пробоотборной струе и регистрируемого сигнала от величины вихревого и дополнительного потоков. Критерием согласования потоков предлагается считать образование вблизи оси пробоотборной струи выраженного вихревого ядра минимального диаметра и достижение максимума регистрируемого от объекта сигнала.

Для проведения экспериментов был разработан вихревой пробоотборник (ВП) с дополнительным каналом, коаксиально охватывающим аналитический канал (рис. 1). В такой схеме выводимый из обратного течения поток ( $Q_{out}$ ) складывается из аналитического и дополнительного ( $Q_{add}$ ) потоков:  $Q_{out} = Q_{add} + Q_{an}$ . Конструкция ВП позволяла изменять потоки  $Q_{vortex}$  и  $Q_{add}$  независимо друг от друга. Диапазон изменения потоков и конструктивные параметры ВП указаны в таблице.



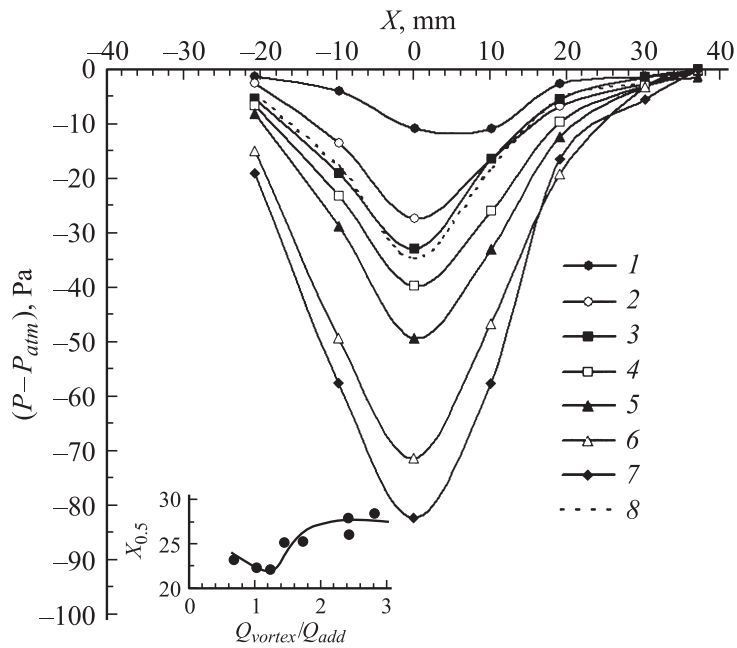
**Рис. 1.** Схема эксперимента с вихревым пробоотборником с дополнительным потоком: 1 — неподвижная крыльчатка, 2 — рефлектор, 3 — граница вихревой струи, 4 — граница обратного потока, 5 — экран, 6 — стеклянная емкость с исследуемым веществом, 7 — аналитический канал, 8 — граница вихревого ядра, 9 — разделяющий канал СПИП, 10 — входная ступень МС, 11 — сменная диафрагма.

Основные параметры вихревого пробоотборника

Параметр	Значение параметра
Диаметр рефлектора, mm	100
Диаметр неподвижной вихревой крыльчатки, mm	58
Ширина неподвижной вихревой крыльчатки, mm	5
Диаметр аналитического канала, mm	13
Диаметр дополнительного канала, mm	21
Диапазон вихревого потока через неподвижную крыльчатку ( $Q_{vortex}$ ), $cm^3/s$	270–9000
Диапазон дополнительного потока ( $Q_{add}$ ), $cm^3/s$	80–3900

В качестве газоанализатора использовали масс-спектрометр (МС) с ионизацией при атмосферном давлении (ИАД) с предварительной сепарацией ионов спектрометром приращения ионной подвижности (СПИП). МС на основе масс-анализатора МХ-7304 подробно описан нами ранее [5]. Конструкция СПИП и способ его стыковки с МС подобен описанному нами в работе [6]. Аналитический поток для тандема СПИП-МС для всех экспериментов составлял  $Q_{an} = 35 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Ионизацию пробы осуществляли радиоактивным источником  $^{63}\text{Ni}$  (Изотоп, С.-Петербург, Россия) с активностью 10 mCi, расположенным в камере ионизации диаметром 13 mm и длиной 10 mm перед разделяющим зазором СПИП. В качестве тестового вещества был выбран N,N-диэтиланилин (ДЭА) ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ , молекулярный вес 149), дающий в масс-спектре устойчиво регистрируемый и хорошо отделяемый от фона пик с массой 150 u, соответствующий иону  $(\text{M} + \text{H})^+$ . Параметры СПИП (напряжение амплитуды высоковольтного, асимметричного по полярности генератора и напряжения компенсации) соответствовали оптимальным значениям для прохождения регистрируемых масс-спектрометром ионов ДЭА.

Схема эксперимента показана на рис. 1, где в качестве объекта использовали экран 5 из оргстекла размером  $250 \times 250 \text{ mm}$ , с отверстием в центре. К отверстию с помощью трубки подсоединяли открытую стеклянную емкость 6 с насыщенными парами ДЭА. Воздушный поток  $Q_{vortex}$  с помощью неподвижной крыльчатки 1 и рефлектора 2 образует в направлении объекта объемный закрученный поток с осевым обратным течением. Границы прямого и обратного течений показаны на рисунке сплошной 3 и пунктирной 4 линиями. Граница вихревого ядра составного вихря отмечена точечной линией 8. Разрежение, создаваемое вихревым потоком, вытягивает пары ДЭА из емкости и далее газовая проба транспортируется обратным течением к устью струи. Из вихревого ядра пары пробы аналитическим потоком  $Q_{an}$  вводятся в анализатор ИАД-СПИП-МС 7. Образующиеся в  $\beta$ -источнике ионы сначала сепарируются по параметрам нелинейной подвижности в разделяющем зазоре СПИП, а затем дополнительно разделяются масс-спектрометром по отношению массы к заряду ( $m/z$ ). Такое двойное разделение позволяет уменьшить химический шум при регистрации целевого вещества. Величину разрежения в вихревой пробоотборной струе определяли с точностью  $\pm 0.7 \text{ Pa}$  U-образным наклонным спиртовым манометром с углом наклона  $10^\circ$ .



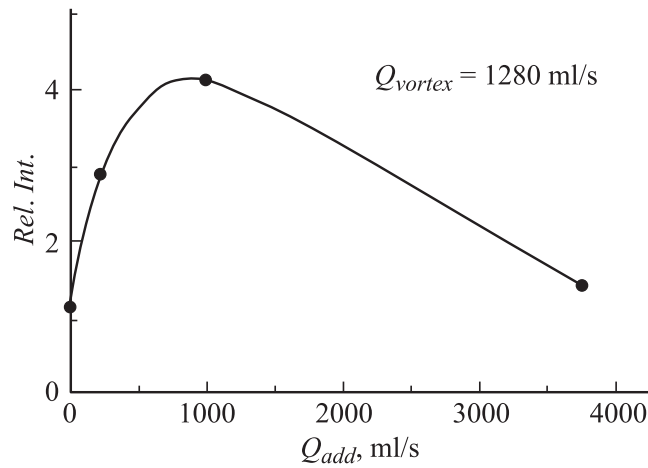
**Рис. 2.** Распределение разрежения в поперечном сечении вихревой пробоотборной струи в зависимости от  $Q_{vortex}$ : 1 —  $Q_{vortex} = 2000$  ml/s, 2 — 3000, 3 — 3600, 4 — 4200, 5 — 5000, 6 — 7000, 7 —  $Q_{vortex} = 8200$  ml/s.  $Q_{add} = 2900$  ml/s. Пунктиром (кривая 8) отмечен расчет по модели составного вихря для  $Q_{vortex} = 3600$  ml/s. Расстояние от рефлектора до объекта 70 mm.

На рис. 2 (основной график) показана зависимость величины разрежения в пробоотборной струе ( $P - P_{atm}$ ) от  $X$  для различных значений соотношения  $Q_{vortex}/Q_{add}$  ( $X$  — координата в направлении радиуса струи,  $P$  — статическое давление в пробоотборной струе,  $P_{atm}$  — давление атмосферы). Соотношение  $Q_{vortex}/Q_{add}$  меняли, изменяя вихревой поток  $Q_{vortex}$  при фиксированном дополнительном потоке  $Q_{add} = 2900$  ml/s. Как видно из рисунка, для всех значений  $Q_{vortex}$  вблизи оси отмечается значительный рост разрежения. Его величина на оси струи увеличивается с ростом вихревого потока и достигает — 80 Pa при  $Q_{vortex} = 8200$  ml/s. При этом отношение

разрежения на оси струи и на границе обратного потока (соответствует значению  $X \sim 32 \text{ mm}$ ) колеблется от 5 до 10, в то время как для обычного закрученного потока, представляющего собой вынужденный вихрь, этот параметр не превышает 1.3. Такой рост разрежения вблизи оси говорит о формировании в пробоотборной струе составного вихря. Если построить зависимость полуширины пика разрежения ( $X_{0,5}$  — ширина пика на половине его высоты) вихревой пробоотборной струи от соотношения  $Q_{vortex}/Q_{add}$  (вставленный график на рис. 2), то на полученной кривой четко прослеживается минимум, соответствующий значению  $Q_{vortex}/Q_{add} = 1.3$  (на основном графике этому соответствует кривая 3 при  $Q_{vortex} = 3600 \text{ ml/s}$ ). Образующееся при этом вихревое ядро имеет минимальный диаметр, что создает наиболее благоприятный режим составного вихря, характеризующийся относительно небольшими потерями пробы. Для соотношения  $Q_{vortex}/Q_{add} = 1.3$ , используя модель составного вихря [2], было рассчитано распределение разрежения ( $P - P_{atm}$ ) в поперечном сечении вихревой струи (рис. 2, кривая 8). Удовлетворительное соответствие расчетов с экспериментом говорит о применимости рассматриваемой модели к формируемой пробоотборной струе.

В дополнение к газодинамическим измерениям была получена зависимость относительной интенсивности сигнала ДЭА, вытягиваемого из объекта, от величины дополнительного потока  $Q_{add}$  (рис. 3). Вихревой поток  $Q_{vortex}$  поддерживали постоянным, равным  $1280 \text{ ml/s}$ . Расстояние от рефлектора до объекта составляло  $70 \text{ mm}$ . Отбор пробы производили по оси пробоотборника. Как видно из рисунка, в этой зависимости существует ярко выраженный максимум, соответствующий величине дополнительного потока  $Q_{add} = 1000 \text{ ml/s}$ . При этом соотношение между вихревым и дополнительным потоками принимает значение  $Q_{vortex}/Q_{add} = 1.28$ , что близко к значению, полученному из газодинамических измерений.

Из представленных экспериментальных данных можно сделать вывод, что соотношение между вихревым и дополнительным потоками  $Q_{vortex}/Q_{add} = 1.3$  является оптимальным для вихревого пробоотборника с дополнительным потоком. В этих условиях в обратном потоке пробоотборной струи формируется составной вихрь с ядром минимального диаметра, обеспечивая минимальные потери пробы и высокое разрежение на поверхности объекта. Если одновременно увеличивать вихревой и дополнительный поток, при сохранении между ними соот-



**Рис. 3.** Зависимость относительного сигнала ДЭА от дополнительного потока.  $Q_{vortex} = 1280$  ml/s. Расстояние от рефлектора до объекта 70 mm. Источник по оси пробоотборника.

ношения  $Q_{vortex}/Q_{add} = 1.3$ , регистрируемый газоанализатором сигнал ДЭА выходит на насыщение при  $Q_{vortex} = 2600$  ml/s и  $Q_{add} = 2000$  ml/s. Ограничение сверху по потоку, на наш взгляд, объясняется уменьшением доли пробы, поступающей в газоанализатор из дополнительного потока, ввиду снижения отношения  $Q_{an}/Q_{add}$  с ростом  $Q_{add}$ . В связи с чем полученные значения  $Q_{vortex} = 2600$  ml/s и  $Q_{add} = 2000$  ml/s являются согласованными с аналитическим потоком газоанализатора СПИП-МС  $Q_{an} = 35$  ml/s.

Таким образом, в работе показано, что согласование вихревого и пробоотборного потоков в системах вихревого пробоотбора является важным фактором, влияющим на эффективность пробоотбора (при согласовании потоков эффективность пробоотбора увеличилась в 4 раза, рис. 3). Кроме того, показано, что согласование потоков может быть осуществлено введением потока, дополнительного к аналитическому, без существенной потери пробы.

Работа поддержана РФФИ, грант 07-08-00143-а.

## Список литературы

- [1] Коломиец Ю.Н. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2002. Т. 2. В. 4. С. 475–484.
- [2] Коломиец Ю.Н. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2002. Т. 2. В. 5–6. С. 563–574.
- [3] Горбачев Ю.П., Ионов В.В., Коломиец Ю.Н. // Патент RU 2279051. Заяв. 05.10.2004. Оpubл. 27.06.2006. Бюл. № 18.
- [4] Motchkine V.S., Krasnobaev L.Y., Bunker S.N. // United States Patent, # 6, 861, 646. March 1, 2005.
- [5] Первухин В.В., Ибрагимов Р.Р., Моралев В.М. // ПТЭ. 1997. № 5. С. 122.
- [6] Первухин В.В., Шевень Д.Г. // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 1. С. 114–120.