

УДК 543.544.5:613.842

Методика определения бенз(а)пирена в аэрозоле сигаретного дыма методом высокоэффективной жидкостной хроматографии

В.П. Быстриakov, Р.В. Авраменко

Учреждение образования «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова»

Статья посвящена определению наиболее типичного химического канцерогена окружающей среды бенз(а)пирена (БАП) в аэрозоле табачного дыма.

Цель исследования: разработка методики определения БАП в аэрозоле табачного дыма сигарет с более простой техникой пробоотбора аэрозоля – без использования курительной машины.

Материал и методы. *Объект исследования – сигареты «Астра» производства Гродненской табачной фабрики (ГТФ, Республика Беларусь).*

Использовался высокоэффективный жидкостный хроматограф Alliance Waters 2695 (США) с флуоресцентным детектором Alliance Waters 2475 (режим: длина волны возбуждения 300 нм, эмиссионный фильтр 418 нм). Компьютерную обработку результатов проводили с помощью программного обеспечения Alliance. Применялась хроматографическая микролонка 150 мм, заполненная обращенно-фазовым сорбентом Hypersil ODS C18, зернение 3 мкм. Колонку снабжали предколонкой, заполненной таким же сорбентом. Элюент – раствор ацетонитрил:вода (4:1).

Результаты и их обсуждение. *Показано, что извлечение БАП из аэрозоля дыма сигарет с помощью водной экстракции неэффективно – приводит к занижению результатов определения БАП на два порядка. Для устранения помех при хроматографировании, связанных с высоким содержанием смол и других балластных и интерферирующих веществ в сигаретном дыме, в методику добавлена процедура очистки экстракта колоночной хроматографией с «сефадексом». Методика апробирована на сигаретах «Астра» (ГТФ). Ее достоверность подтверждена контрольным опытом, а также анализом «пробы с добавкой». Воспроизводимость результатов составляет от 0,2 до 3,5%.*

Заключение. *Разработана методика определения БАП в аэрозоле табачного дыма сигарет методом ВЭЖХ с более простой техникой пробоотбора аэрозоля. Предложено аспирацию дыма проводить через двойной фильтр АФА-ВП (ХП)-20.*

Ключевые слова: бенз(а)пирен (БАП), канцерогенность, табачный дым, пробоотбор, определение, ВЭЖХ.

Identification Methods of Benzo(a)Pyrene in Aerosole of Cigarette Smoke by High Resolution Liquid Chromatography

V.P. Bystriakov, R.V. Avramenko

Educational Establishment «Vitebsk State University named after P.M. Masherov»

The article centers round identification of a most typical chemical cancerogene of the environment Benzo(a)Pyrene (BAP) in tobacco smoke aerosole.

The purpose of the article is development of BAP identification method in aerosole of tobacco smoke of cigarettes with a simpler technique of aerosole sample taking – without using a smoking machine.

Material and methods. *The object of the research is GTP Astra cigarettes, Republic of Belarus.*

High resolution liquid chromatograph Alliance Waters 2695 (USA); fluorescent detector Alliance Waters 2475 (mode: disturbance wave length 300 nm, emission filter 418 nm) were used. Computer processing of the results was conducted with Alliance software. Chromatography 150 mm microcolumn was used filled with reverse phase sorbent Hypersil ODS C18 3 mcm grained. The column was supplied with precolumn filled with the same sorbent Eluent – acetonipril:water (4:1) solution.

Findings and their discussion. *It is shown that BAP extraction from cigarette smoke aerosole with water extraction is not efficient; it results in two order reducing the results of BAP detection. To eliminate infringements while chromatography connected with high content of tar and other ballast and interfereing substances in cigarette smoke, the procedure of purification of the extract with column chromatography with «sefadex» was introduced to the method. The method was tested on GTP Astra cigarettes. Reliability of the developed method is confirmed by the control experiment as well as by «samplpe with addition» analysis. Repetition of the results is 0,2 to 3,5%.*

Conclusion. *BAP detection method in tobacco smoke aerosole by the method of HRLC with a simpler technique of aerosole sample taking is developed. It is offered by smoke aspiration trough double filter AFA-VP-20.*

Key words: Bemzo(a)Pyrene, BAP, cancerogene, tobacco smoke, sample taking, detection, HRLC.

Различают два изомера бензпирена: (а) 1,2- (или 3,4-) бензпирен и менее распространенный (е) 4,5-бензпирен. Бенз(а)пирен (БАП) – органическое твердое, но довольно летучее вещество, его пары могут разноситься на значительные расстояния. Он наиболее распространен и канцерогенен среди других известных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), поэтому рассматривается как типичный химический канцероген окружающей среды. Помимо канцерогенного, БАП оказывает мутагенное, эмбриотоксическое, гепатотоксическое действие. По этой причине БАП относится к 1 классу опасности (чрезвычайно опасное вещество). Канцерогенность бенз(е)пирена незначительна [1]. Мониторинг содержания БАП используется для оценки содержания и степени канцерогенного эффекта всех возможных присутствующих ПАУ [2–3].

БАП является продуктом неполного сгорания органических соединений. Сжигание практически всех горючих материалов приводит к его образованию. Количество образующегося при этом БАП мало зависит от полноты сгорания топлива; условиями его образования являются высокие температуры и наличие органического вещества. Образование БАП может происходить и без процессов горения – при пиролизе, тлении, полимеризации. В атмосфере БАП преимущественно адсорбирован на взвешенных частицах и содержится в саже, дыме и смолистых веществах, образуемых при горении. Основными источниками БАП, попадающего в организм человека, являются окружающий воздух, табачный дым, сжигание древесины, угля или других биомасс, автомобильный транспорт, асфальт, каменноугольные смолы.

Преимущественный путь поступления БАП в организм человека – ингаляционный. Среднесуточная предельно допустимая концентрация (ПДК) БАП в воздухе населенных мест составляет $0,001 \text{ мкг/м}^3$, ПДК в воздухе рабочей зоны – $0,15 \text{ мкг/м}^3$ [4]. В пищевом сырье, полученном из экологически чистых растений, концентрация БАП составляет $0,03\text{--}1 \text{ мкг/кг}$. С пищей взрослый человек получает БАП в количестве $0,0006 \text{ мг/год}$. Причем его содержание в продуктах питания колеблется в зависимости от способа их технологической и кулинарной обработки и степени загрязнения окружающей среды. Термическая обработка приводит к увеличению содержания БАП до 50 мкг/кг и более. В интенсивно загрязненных районах эта доза увеличивается в 5 раз и более [5].

БАП – обязательный компонент табачного дыма. Одна сигарета является источником при-

мерно $0,05\text{--}0,09 \text{ мкг}$ БАП [6]. Для стран с удовлетворительным состоянием окружающей среды именно канцерогенные соединения, образующиеся при курении табака, а также содержащиеся в крепких алкогольных напитках, а именно ПАУ, нитрозамины и ацетальдегид, считаются основной причиной рака пищевода [7].

Для определения БАП используют высокочувствительные методы хроматографии или хромато-масс-спектрометрии. Опубликовано много работ, посвященных анализу БАП в воздухе рабочей зоны, городов, жилых помещений, в воде, пищевых продуктах. Так, метод капиллярной газовой хроматографии/масс-спектрометрии применен для определения БАП в диапазоне концентраций $5,1\text{--}20,2 \text{ нг/м}^3$ в воздухе как внутри, так и снаружи жилых помещений [7]. Различные методики с использованием высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с флуориметрическим детектированием позволили обнаруживать до 10 нг БАП/в пробе воздуха алюминиевого производства [2]; до $0,72 \text{ нг/м}^3$ в воздухе внутри и снаружи жилых помещений [3]. В Республике Беларусь и Российской Федерации разработаны методические указания по измерению концентраций БАП и других ПАУ в атмосферном воздухе и воздухе рабочей зоны методом ВЭЖХ с флуориметрическим детектированием [8–9].

В подобных методиках важны стадии пробоотбора и пробоподготовки, поскольку от качественного проведения именно этих стадий во многом зависят чувствительность и точность определения. Методики определения БАП и других ПАУ в атмосферном воздухе населенных пунктов и воздухе рабочей зоны с низким содержанием смолистых веществ в основном схожи процедурами пробоотбора и пробоподготовки, которые сравнительно более просты в исполнении. Методика МУК 4.1.1273-03, например, основана на улавливании БАП на аэрозольный фильтр, извлечении его гексаном, концентрировании экстракта выпариванием [9]. В случае большого содержания смолистых веществ (например, рудничная атмосфера) требуется применение дополнительных процедур, например, колоночной или тонкослойной хроматографии (ТСХ) для очистки пробы. Так, в методике МУ № 84 после концентрирования ПАУ на фильтре предусмотрена очистка проб методом ТСХ. Определение БАП и других ПАУ по этой методике осуществляется методом ВЭЖХ с флуоресцентным или УФ-детектором [8].

Методики определения БАП и других ПАУ в аэрозоле табачного дыма, описанные в зарубежной

литературе, предусматривают для пробоподготовки жидкостную или твердофазную экстракцию. Определение проводится, как правило, с использованием сочетания хроматографического разделения (ВЭЖХ или газовой хроматографии) и масс-спектрометрического детектирования. Пробоотбор осуществляется обычно с использованием специального дополнительного оборудования – курительной машины [9]. Эти машины в Республике Беларусь не производятся. Методика определения БАП в аэрозоле табачного дыма отсутствует в Национальном реестре ТНПА; методики определения в этом объекте методом ВЭЖХ с флуориметрическим детектированием не обнаружены нами и в научных публикациях.

Цель статьи: разработка методики определения БАП в аэрозоле табачного дыма сигарет с более простой техникой пробоотбора аэрозоля – без использования курительной машины, с последующими стадиями извлечения из этого аэрозоля БАП жидкостной экстракцией, концентрирования и определения БАП методом ВЭЖХ с флуориметрическим детектированием.

Материал и методы. Объект исследования – сигареты «Астра» производства Гродненской табачной фабрики (ГТФ, Республика Беларусь), приобретенные в розничной сети.

Система ВЭЖХ: жидкостный хроматограф Alliance Waters 2695 (США); детектор флуоресцентный Alliance Waters 2475; программное обеспечение Alliance. Использовалась хроматографическая микроколонка длиной 150 мм, заполненная обращенно-фазовым сорбентом Hypersil ODS C18, зернение сорбента 3 мкм. В условиях выполнения анализа эта колонка должна иметь эффективность не менее 5000 теоретических тарелок по пику бенз(а)пирена. Нижняя граница определяемого содержания БАП в растворе (при соотношении сигнал/шум = 3) для применяемой системы должна быть не более 0,002 мкг/см³. Колонку снабжали предколонкой, заполненной таким же сорбентом.

Оборудование: микрошприц 50 мкл; ротационно-вакуумный испаритель ИКА RV 10 с водяной баней; вакуумный насос; весы лабораторные общего назначения (ГОСТ 24104); электроаспиратор с устройством измерения расхода ОП-442 ТЦ, обеспечивающий расход воздуха 0,2–20 л/мин (ТУ 9443-026-31988614-99); поглотитель Полежаева (ГОСТ 25336-82); установка ультразвуковая WUC-A03H DAIHAN Scientific (Южная Корея); ротационно-вакуумный испаритель ИКА RV 10 с водяной баней (Германия); таймер; фильтродержатель (аллонж закрытый)

ИРА-20 ТУ 95.72.05-77; термометр лабораторный (ГОСТ 28498).

Посуда: колбы мерные 2-го класса точности вместимостью 25, 50, 100 куб. см (ГОСТ 1770); пипетки градуированные 2-го класса точности вместимостью 1, 2, 5 и 10 куб. см (ГОСТ 29227); цилиндры мерные вместимостью 50, 100 и 200 куб. см (ГОСТ 1770); колбы круглодонные или грушевидные для перегонки вместимостью 50, 100 куб. см НШ 29; колбы плоскодонные вместимостью 100 и 250 куб. см с пришлифованной пробкой (П-1-100(250)-29/32); стаканы химические вместимостью 100 куб. см; колбы выпарительные; пробирки стеклянные с притертыми пробками вместимостью 10 и 15 куб. см П4-5(10)-14/23 ХС (ГОСТ 25336); колонка хроматографическая стеклянная с пришлифованной пробкой (внутренний диаметр не менее 14 мм, длина 20 см). Посуду для приготовления и хранения элюента моют только серной кислотой (без применения других моющих средств) и ополаскивают дистиллированной водой и ацетонитрилом. Остальную стеклянную посуду моют горячей водой с моющим средством, тщательно ополаскивают дистиллированной водой и сушат 15–30 мин при температуре 120°C. Охладив, промывают ацетоном и хранят в укупоренном виде.

Реактивы и материалы: ацетонитрил для жидкостной хроматографии о.с.ч., «Криохром»; вода дистиллированная (ГОСТ 6709); гексан, х.ч. (ТУ 6-09-3375-78); серная кислота, х.ч. (ГОСТ 6398); сефадекс LH-20 (Pharmacia, Швеция); фильтры АФА-ВП (ХП)-20.

Стандартный образец бенз(а)пирена ГСО 7515.

Стандартный раствор бенз(а)пирена в ацетонитриле массовой концентрации 100 мкг/см³. Раствор хранят в холодильнике не более трех месяцев.

Рабочие растворы бенз(а)пирена массовой концентрации 1; 0,1; 0,05; 0,01; 0,005; 0,002 мкг/см³ (срок хранения в холодильнике от 1 года до 1 недели в зависимости от концентрации).

Раствор бенз(а)пирена в гексане 0,05 мкг/см³ для пробного элюирования. Отбирают 1 см³ раствора бенз(а)пирена в ацетонитриле концентрации 0,05 мкг/см³, удаляют растворитель упариванием при температуре 40–45°C в вакууме водоструйного насоса, растворяют сухой остаток в 1 см³ гексана. Используют свежеприготовленный раствор.

В известных методиках определения БАП в различных объектах методом ВЭЖХ в качестве элюента иногда применяют чистый гексан, но в

основном используется смесь ацетонитрил:вода в соотношении 4:1, которая является оптимальным элюентом для применяемой аналитической колонки ODS C18 с обращенной фазой. Этот элюент применялся и в нашей работе. Для быстрой дегазации готовой смеси проводят вакуумирование емкости с элюентом, подключая ее к водоструйному насосу либо поместив на ультразвуковую баню. Срок хранения элюента в условиях, исключающих испарение компонентов смеси, не ограничен.

Для разработки методики пробоотбора аэрозоля сигаретного дыма и последующей экстракции БАП было проведено экспериментальное сравнение двух возможных методик, различающихся принципом пробоотбора и техникой проведения экстракции.

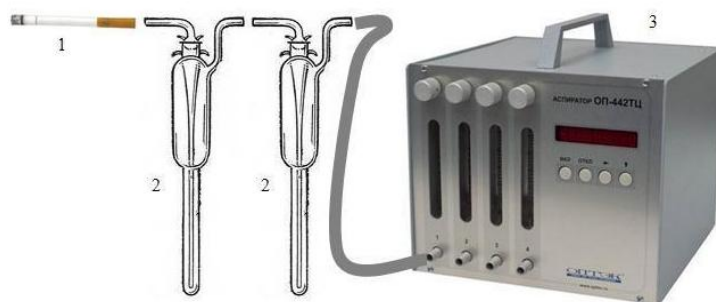
Методика 1. Принцип пробоотбора – аспирация дыма через два последовательно соединенных поглотителя Полежаева, заполненных дистиллированной водой (установка № 1 – рис. 1).

Методика 2. Принцип пробоотбора – аспирация дыма через аллонжи с двойным фильтром АФА-ВП (ХП)-20. Подобная техника пробоотбо-

ра ранее была предложена для определения БАП в атмосферном воздухе и воздухе рабочей зоны (МУК 4.1.1273-03) [10]. Схема установки № 2 для аспирации дыма (прокуривания) представлена на рис. 2.

В обеих методиках с помощью электроасpirатора ОП-442 ТЦ прокуривались поочередно две сигареты со скоростью 0,2 л/мин, время прокуривания по 2,5 мин на сигарету.

По методике 1: по окончании прокуривания вода из поглотителей сливалась в делительную воронку. БАП трижды экстрагировался из водной фазы гексаном порциями по 30 см³, гексановые фракции объединялись. Далее гексан отгонялся ротационным испарителем, сухой остаток растворяли в 1 см³ ацетонитрила, 10 мкл экстракта переносилось автосамплером в приемный порт жидкостного хроматографа. Анализируемые растворы хроматографировали дважды в одинаковых условиях. Режим хроматографирования соответствовал методике определения БАП в пищевых продуктах согласно СТБ ГОСТ Р 51650-2001 [11].



1 – сигарета; 2 – последовательно подключенные поглотители, заполненные водой;
3 – электроасpirатор.

Рис. 1. Установка № 1 для водного извлечения бенз(а)пирена из аэрозоля дыма сигарет.



1 – сигарета; 2 – последовательно подключенные аллонжи с закрепленными в них фильтрами АФА-ВП; 3 – электроасpirатор.

Рис. 2. Установка № 2 для воздушного извлечения бенз(а)пирена из аэрозоля дыма сигарет.

По методике 2: фильтры после прокуривания помещались в колбу, трижды заливались 30–50 см³ гексана с последующей экстракцией в течение 20 мин на ультразвуковой бане при комнатной температуре. Дальнейшие стадии обработки объединенного экстракта были подобны стадиям методики 1. Режим хроматографирования соответствовал МУ № 84 [8].

Результаты и их обсуждение. *Оптимизация режимов работы хроматографа.* При изменении длины волны возбуждения в интервале от 254 нм до 300 нм длина волны регистрации изменяется от 390 до 450 нм. В результате сканирования волн регистрации оптимальной длиной волны регистрации стала 418 нм. Режим работы флуориметрического детектора: длина волны возбуждения 300 нм, эмиссионный фильтр 418 нм.

Было проведено несколько экспериментов, в которых менялись скорость потока и температура термостата колонки для наилучшего выделения БАП и обеспечения несмешивания сигналов БАП и других компонентов смеси. Наиболее выгодным оказался изократический режим: скорость потока 1,2 см³/мин, температура термостата колонки 35±1С°. При этом режиме время выхода пика бенз(а)пирена составляла 8,4–8,8 мин. Чувствительность усилителя: 10. Время анализа: 12 мин.

Результаты анализов. При использовании методики 1 в аэрозоле дыма сигарет «Астра» зарегистрировано содержание БАП 0,0012 мкг/см³. При применении методики 2 получен результат на два порядка выше – 0,1330 мкг/см³. Таким образом, извлечение БАП из аэрозоля дыма сигарет с помощью водной экстракции, которая использовалась в методике 1, неэффективно.

Что касается методики 2, то в процессе ее апробации выяснились проблемы на стадиях хроматографирования и детектирования: недопустимое повышение давления в рампе хроматографа более 400 атм., «шумный» сигнал детектора. В результате при применении методики 2 фильтра, а также аналитическая колонка быстро выходят из строя. Данные проблемы можно объяснить высоким содержанием смол и других балластных и интерферирующих веществ в дыме данной марки сигарет.

Устранить эти проблемы может дополнительная очистка экстракта. В стандартных методиках анализа загрязненного воздуха она осуществляется, например, методом ТСХ [8]. Но это сравнительно трудоемкий процесс. Преимущества имеет процедура очистки, предусмотренная в мето-

дике определения БАП в пищевых продуктах, – колоночной хроматографией на колонке с «сефадексом» [11]. Стадия очистки экстракта с помощью колонки с «сефадексом» была добавлена в методику 2 (далее просто «методика»).

Проведение экстракции. Экспонированные фильтры помещают в колбу с притертой пробкой вместимостью 0,5 дм³. В колбу заливают 30–50 см³ н-гексана и в течение 20 мин проводят экстракцию с помощью ультразвуковой бани при комнатной температуре. Экстракт сливают в мерный цилиндр. В колбу снова заливают 30 см³ н-гексана и экстрагируют в ультразвуковой бане 20 минут. Для контроля полноты извлечения фильтр оставляют в третьей порции н-гексана на ночь в вытяжном шкафу. В среднем на экстракцию расходуют 100–150 см³ н-гексана. Гексановый экстракт переносят в выпарительную колбу, растворитель упаривают досуха, добавляют 1 см³ этанола. Аналогично для каждой партии фильтров из неэкспонированных фильтров готовят нулевую пробу.

В стакан вместимостью 100 см³ отвешивают (2,5±0,2) г сефадекса LH-20, добавляют 20 см³ этилового спирта и оставляют для набухания на 3–4 ч. Затем гель переносят, смывая небольшим количеством спирта, в стеклянную хроматографическую колонку, дают растворителю стечь таким образом, чтобы слой спирта над слоем сорбента оставался не ниже 2 мм. На подготовленную колонку наносят пипеткой остаток экстракта из колбы, трижды смывая его из колбы этиловым спиртом порциями по 0,5 см³. Элюирование из колонки ПАУ, в том числе БАП, проводят 40 см³ этилового спирта, первую фракцию объемом 12 см³ отбрасывают, собирают вторую фракцию объемом 25 см³. Скорость элюирования растворителя 0,5 см³/мин обеспечивают, создавая небольшое избыточное давление потоком сжатого воздуха через насадку, соединенную с воздушной или газовой баллоном. Газ следует подавать через стеклянную трубку, заполненную силикагелем. Колонку с сефадексом LH-20 можно использовать многократно. Для этого, не допуская высыхания сорбента после фракционирования, колонку промывают 25 см³ этилового спирта и наносят следующую пробу.

Раствор второй фракции переносят в грушевидную колбу вместимостью 50 см³, растворитель упаривают до объема 0,5–1,0 см³, его остаток удаляют в потоке воздуха, добавляют 1 см³ ацетонитрила. После этого 10 мкл раствора отбирается с помощью микрошприца и вводится в инжектор жидкостного хроматографа.

Сравнение результатов анализа различных проб

Тип пробы	Содержание бенз(а)пирена (мкг/проба)
контроль	0,000
аэрозоль дыма сигареты «Астра»	0,029
контрольная проба с добавкой: ацетонитрил 90% + 10% рабочего раствора БАП концентрации 1 мкг/см ³	0,094
экстракт дыма сигарет «Астра» 90% + 10% рабочего раствора БАП концентрации 1 мкг/см ³	0,121

Градуировка хроматографической системы. Градуировка системы проводится путем регистрации хроматограммы раствора бенз(а)пирена с концентрацией 0,1; 0,05; 0,01; 0,005; 0,002 мкг/см³. Регистрируют не менее двух хроматограмм для каждой концентрации, измеряют высоту пика бенз(а)пирена и находят среднее арифметическое параллельных концентраций.

Различие между измеренными величинами времен удерживания должно быть не более 5% от их среднего значения.

Проведение хроматографических измерений. Регистрируют хроматограммы концентратов (каждого не менее двух раз) в тех же условиях, при которых была проведена градуировка системы. Обнаружение БАП в пробе проводят по совпадению времени удерживания определяемого пика со временем удерживания пика БАП в концентрате градуировочного раствора. Если БАП в пробе обнаружен, то измеряют высоту (площадь) полученного пика для каждого из двух измерений и проверяют их сходимость.

Обработка результатов измерений. За результат измерения высоты (площади) пика БАП принимают среднее арифметическое значение не менее двух измерений. Массовую концентрацию БАП в концентрате (или в разбавленном концентрате) определяют по градуировочному графику по значению площади пика БАП. Содержание БАП в одной сигарете в анализируемой пробе X, мкг/сиг. вычисляют по формуле:

$$X = P (V_k / 0,010) Q,$$

где P – площадь пика БАП, mVc, усл. ед.; V_k – объем элюата пробы, мкл; 0,010 – объем введенного элюата, мл; Q – коэффициент разбавления.

Воспроизводимость результатов составляет от 0,2 до 3,5%.

Контрольный опыт проводили, осуществляя все стадии анализа согласно разработанной ме-

тодике, но без сигарет – с чистыми фильтрами – контрольная проба.

Для подтверждения правильности идентификации пиков в случае сложных проб можно выполнить «пробу с добавкой». В данном случае использовали добавку раствора БАП к концентрату пробы. О достоверности идентификации можно судить по увеличению высоты (площади) предполагаемого пика БАП. Величина добавки должна составлять 50–150% от найденного содержания БАП в концентрате пробы, кроме того, необходимо учитывать разбавление концентрата при введении добавки и для его снижения использовать более концентрированные растворы. Использовался рабочий раствор БАП концентрации 1 мкг/см³. Условия анализа были идентичны вышеописанным. Результаты анализов, представленные в табл., подтверждают правильность идентификации пика БАП.

Заключение. Для определения БАП в аэрозоле сигаретного дыма разработана более простая методика – без использования курительной машины. Показано, что извлечение БАП из аэрозоля дыма сигарет с помощью водной экстракции неэффективно – приводит к занижению результатов определения БАП на два порядка. Рекомендуются техника простого пробоотбора – аспирация дыма через двойной фильтр АФА-ВП (ХП)-20. Последующие стадии: извлечение БАП жидкостной экстракцией, концентрирование и определение БАП методом ВЭЖХ с флуориметрическим детектированием.

Для устранения помех при хроматографировании, связанных с высоким содержанием смол и других балластных и интерферирующих веществ в сигаретном дыме, в методику добавлена процедура очистки экстракта колоночной хроматографией с «сефадексом». Методика апробирована на сигаретах «Астра» (ГТФ). Ее достоверность подтверждена контрольным опытом, а также анали-

зом «пробы с добавкой». Воспроизводимость результатов составляет от 0,2 до 3,5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куценко, С.А. Основы токсикологии / С.А. Куценко. – М.: Фолиант, 2004. – 570 с.
2. Sanderson, E.G. Use of Benzo[a]pyrene Relative Abundance Ratios to Assess Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Ambient Atmosphere in the Vicinity of a Söderberg Aluminum Smelter / E.G. Sanderson, J.-P. Farant // J. of the Air & Waste Management Association. – 2000. – Vol. 50, № 12. – P. 2085–2092.
3. Jungang, Lv. Indoor and outdoor air pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Xuanwei and Fuyuan, China / Lv Jungang [et al.] // J. Environ. Monit. – 2009. – № 11. – P. 1368–1374.
4. Перечень веществ, продуктов, производственных процессов, бытовых и природных факторов, канцерогенных для человека: ГН 10-66 РБ 98. Постановление Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 29 апр. 1998 г. № 18. Дата введения – с момента опубликования.
5. Роева, Н.Н. Безопасность продовольственного сырья и продуктов питания / Н.Н. Роева. – М.: МГУТУ, 2009. – 108 с.
6. Lu, H. Pollution patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons in tobacco smoke / H. Lu, L.Z. Zhu // J. Hazard. Mater. – 2007. – Vol. A139. – P. 193–198.
7. Deziel, Nicole C. A multi-day environmental study of polycyclic aromatic hydrocarbon exposure in a high-risk region for esophageal cancer in China / Nicole C. Deziel [et al.] // J. of Exposure Science and Environmental Epidemiology. – 2013. – № 23. – P. 52–59.
8. Методические указания по измерению концентраций бенз(а)пирена, нафталина, фенантрена, антрацена, пирена, 1,2-бензантрацена, хризена, бенз(е)пирена, 1,12-бензперилена в воздухе рабочей зоны методом жидкостной хроматографии: МУ № 84 // МУ, вып. 1. – Минск, 1993. – 5 с.
9. Zha, Q. Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Particulate Phase of Cigarette Smoke Using a Gas Chromatographic–High-Resolution Mass Spectrometric Technique / Q. Zha, N.X. Qian, S.C. Moldoveanu // J. of Chromatographic Science. – 2002. – Vol. 40. – P. 403–408.
10. Измерение массовой концентрации бенз(а)пирена в атмосферном воздухе и воздухе рабочей зоны методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с флуориметрическим детектированием. Методические указания: МУК 4.1.1273-03. – Введ. 01.09.2003.
11. Продукты пищевые. Методы определения массовой доли бенз(а)пирена: СТБ ГОСТ Р 51650-2001. – Введ. 30.05.01. – Минск, 2001. – 18 с.
1. Kutsenko S.A. *Osnovi toksikologii* [Fundamentals of Toxicology], Moscow, Foliant, 2004, 570 p.
2. Sanderson E.G. Use of Benzo[a]pyrene Relative Abundance Ratios to Assess Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Ambient Atmosphere in the Vicinity of a Söderberg Aluminum Smelter / E.G. Sanderson, J.-P. Farant // J. of the Air & Waste Management Association. – 2000. – Vol. 50, № 12. – P. 2085–2092.
3. Jungang Lv. Indoor and outdoor air pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Xuanwei and Fuyuan, China / Lv Jungang [et al.] // J. Environ. Monit. – 2009, № 11. – P. 1368–1374.
4. *Perechen veshchestv, produktov, proizvodstvennikh protsessov, bitovikh i prirodnikh factorov, kantserogennikh dlia cheloveka: GN10-66 RB 98. Postanovleniye Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Respubliki Belarus ot 29 apr. 1998 g. No 18* [List of Substances, Products, Manufacture Processes, Domestic and Natural Factors which are Cancerogene for Humans: GN 10-66 RB 98. April 29, 1998 No 18 Decree of Head Sanitary Doctor of the Republic of Belarus].
5. Royeva N.N. *Bezopasnost prodovolstvennogo siriya i produktov pitaniya* [Safety of Food Raw and Foodstuff], M., MGUTU, 2009, 108 p.
6. Lu H. Pollution patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons in tobacco smoke / H. Lu, L.Z. Zhu // J. Hazard. Mater. – 2007. – Vol. A139. – P. 193–198.
7. Deziel Nicole C. A multi-day environmental study of polycyclic aromatic hydrocarbon exposure in a high-risk region for esophageal cancer in China / Nicole C. Deziel [et al.] // J. of Exposure Science and Environmental Epidemiology. – 2013, № 23. – P. 52–59.
8. *Metodicheskiye ukazaniya po izmereniyu kontsentratsii benz(a)pirena, naftalina, antratsena, pirena, 1,2-benzantratsena v vozdukh rabochei zoni metodom zhidkostnoi khromatografii: MU No 84 // MU vip. 1* [Methodological Guidelines on Measuring Concentrations of Benz(a)pyrene, Naphtalene, Fenantrene, Anthracene, Pyrene, 1,12-Benzanthracene, Chryzene, Benz(a)pyrene in the Operation Zone Air by Liquid Chromatography], Minsk, 1993, 5 p.
9. Zha Q. Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Particulate Phase of Cigarette Smoke Using a Gas Chromatographic–High-Resolution Mass Spectrometric Technique / Q. Zha, N.X. Qian, S.C. Moldoveanu // Journal of Chromatographic Science. – Vol. 40. – August 2002. – P. 403–408.
10. *Izmereniye massovoi kontsentratsii benz(a)pirena v atmosfernom vozdukh i v vozdukh rabochei zoni metodom visokoeffektivnoi zhidkostnoi khromatografii s fluorimetricheskimi detektirovaniyem. Metodicheskiye ukazaniya: MUK 4.1.1273-03. Vved. 01.09.2003* [Detection of Mass Concentration of Benz(a)pyrene in Atmospheric Air and in Operation Zone Air by High Resolution Chromatography with Fluorimetric Detection. Methodological Guidelines], 01.09.2003.
11. *Produkty pishcheviye. Metodi opredeleniya massovoi doli benz(a)pirena: STB GOST R 51650-2001* [Foodstuff. Methods of Mass Concentration of Benz(a)Pyrene], Minsk, 2001, 18 p.

Поступила в редакцию 23.07.2015

Адрес для корреспонденции: e-mail: bystrakou@tut.by – Быстряков В.П.