



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.544.5.068.7

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12141

Анализ синтетических красителей в сточных водах методом ВЭЖХ

**Игорь Артемьевич Платонов[✉], Ирина Михайловна Муханова,
Максим Юрьевич Лабаев, Алена Александровна Салтанова**

Самарский национально-исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара,
Россия, pia@ssau.ru[✉]

Аннотация. Анализ синтетических красителей в сточных водах является актуальной задачей современной аналитической химии, поскольку повышенное содержание красителей в сточных водах может негативно сказаться на экологии. Для контроля за содержанием красителей в различных объектах часто применяется обращённо-фазовая высокоэффективная жидкостная хроматография (ОФ ВЭЖХ), которая позволяет достоверно определить содержание интересующих веществ. Целью данной работы являлось создание и оценка метрологических характеристик методики анализа синтетических красителей в сточных водах предприятий с повышенным содержанием неорганических солей. Хроматографическая система, используемая в данной работе, состояла из насоса высокого давления производства Кнауер, разделение осуществлялось на обращено-фазовой колонке Kromasil 100-5-C18(w) (4.6×250 мм) в режиме градиентного элюирования. В качестве подвижной фазы применяли ацетонитрил и раствор ацетата аммония. Детектирование синтетических красителей производилось на диодно-матричном детекторе Азуга. В работе представлены результаты концентрирования 10 синтетических красителей на коммерчески доступных патронах для твердофазной экстракции, которые подходят для работы с водными растворами с повышенным содержанием неорганических солей. Для каждого вещества была рассчитана степень концентрирования из дистиллированной и модельной сточной вод, которая варьируется от 2 до 98%. Наивысшую степень концентрирования из анализируемых патронов при эксплуатации в условиях близким к реальным сточным водам показал патрон марки «Диапак П», при рН концентрируемого раствора равного 4. По результатам данной работы разработана и валидирована методика одновременного определения 10 синтетических пищевых красителей (СПК) (E102, E104, E110, E122, E124, E129, E131, E133, E142, E151) в водных и органических растворах. Результаты работы могут быть полезны в области аналитического контроля за содержанием синтетических красителей в сточных водах предприятий. Предел промежуточной прецизионности методики не превысил 5%, а расширенная неопределенность измерения составила менее 10%.

Ключевые слова: обращено-фазовая ВЭЖХ, синтетические пищевые красители, диодно-матричное детектирование, твердофазная экстракция.

Для цитирования: Платонов И.А., Муханова И.М., Лабаев М.Ю., Салтанова А.А. Анализ синтетических красителей в сточных водах методом ВЭЖХ // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 2. С. 236-245. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12141>

Original article

HPLC analysis of synthetic dyes in wastewater

Igor A. Platonov[✉], Irina M. Mukhanova, Maxim Yu. Labaev, [✉], Alyona A. Saltanova
Korolev Samara National Research University, Samara, Russian Federation, pia@ssau.ru[✉]

Abstract. The analysis of synthetic dyes in wastewater is an urgent task of modern analytical chemistry since an increased content of dyes in wastewater can have an adverse effect on the environment. Reverse phase high performance liquid chromatography (RP HPLC) is often used to control the content of dyes in various objects, which makes it possible to reliably determine the content of specified substances. The purpose of this work was to create and evaluate the metrological characteristics for the method of analysis of synthetic dyes in the



industrial wastewater with a high content of inorganic salts. The chromatographic system used in this work was a Knauer high-pressure pump. The separation was performed on a Kromasil 100-5-C18 (w) reverse phase column (4.6 × 250 mm) in the gradient elution mode. Acetonitrile and ammonium acetate solution were used as the mobile phase. Synthetic dyes were detected on an Azura diode array detector. The paper presents the results of concentrating 10 synthetic dyes on commercially available solid phase extraction cartridges that were suitable for working with aqueous solutions with a high content of inorganic salts. For each substance, the degree of concentration from distilled and model wastewater was calculated, which varied from 2 to 98%. Among the analysed cartridges, the highest degree of concentration during operation in conditions close to real wastewater was shown by the Diapak P cartridge, at a pH of the concentrated solution equal to 4. The results of this study were used to develop and validate a method for a simultaneous detection of 10 synthetic food dyes (SFD) (E102, E104, E110, E122, E124, E129, E131, E133, E142, E151) in aqueous and organic solutions. The results of the study can be used to provide analytical control of the content of synthetic dyes in the industrial wastewater. The limit of intermediate precision of the method did not exceed 5%, and the expanded uncertainty of the measurements was less than 10%.

Keywords: reverse phase HPLC, synthetic food dyes, diode-array detection, solid-phase extraction.

For citation: Platonov I.A., Mukhanova I.M., Labaev M.Yu., Saltanova A.A. HPLC analysis of synthetic dyes in wastewater. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2024. 24(2): 236-245. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12141>

Введение

Загрязнение сточных вод отходами производств является актуальной проблемой экологического контроля. Антропогенные факторы оказывают сильное негативное влияние на окружающую среду. Воздух, вода, земля, живые организмы, растения, животные и т. д. страдают от промышленных загрязнений. Сточные воды, попадая в водотоки, представляют опасность в первую очередь для биоценозов водоохраных зон и человека. Одним из основных органических загрязнителей воды являются различные красители, источниками которых являются предприятия по изготовлению красящих веществ, текстильные красильные производства, пищевая промышленность [1, 2]. При этом 10-15% красителей, используемых при крашении, попадают в окружающую среду в виде отходов [1]. Поскольку текстильные сточные воды являются токсичными, мутагенными и канцерогенными из-за присутствия красителей они нежелательны для любого использования. Ряд работ посвящен различным способам очистки сточных вод от красителей [3-8].

В связи с вышесказанным встает вопрос контроля содержания красителей в сточных водах, с помощью различных физико-химических методов анализа.

Современными широко распространенными методами определения синтетических красителей являются хроматографические методы: обращено-фазовая высокоэффективная жидкостная хроматография (ОФ ВЭЖХ), ион-парная ВЭЖХ, ультравысокоэффективная жидкостная хроматография (УВ ВЭЖХ) [9, 15].

В большинстве случаев для определения красителей наиболее рациональным является применение обращено-фазовой ВЭЖХ. К преимуществам данного метода можно отнести использование растворителей (ацетонитрил, метанол, вода) позволяющих работать в широком УФ-диапазоне, это дает возможность применять высокочувствительный УФ-спектрофотометр, который имеет низкий предел обнаружения по отношению к широкому ассортименту органических соединений [9], а в случае с красителями может выступать практически как селективный детектор, если проводить идентификацию красителей в видимом диапазоне электромагнитного излучения.

Как правило, для определения синтетических красителей применяют методики, основанные на использовании дорогостоящего ион-парного реагента [10-14], который может адсорбироваться на неподвижной фазе хроматографической колонки, что может негативно сказаться на её эксплуатационных характеристиках [15].

Однако существуют методики, лишенные этого недостатка с применением фосфатного или ацетатного буфера [16]. Для детектирования чаще всего используют спектрофотометрические детекторы ультрафиолетовой-видимой области, диодно-матричные (DAD), фотодиодные детекторы (PDA) [15].

В работе [17] описывают применение обращено-фазовой ВЭЖХ для одновременного определения 17 синтетических пищевых красителей в различных группах пищевой продукции. Анализ проводили на применении колонки C18 (Zorbax XDB, 150 x 4.6 мм, 5.0 мкм) в режиме градиентного элюирования. Использовали подвижную фазу состава: А – 1.5% раствор ацетата аммония, В – метанол: ацетонитрил (80:20).

Для определения синтетического пищевого красителя E110 в безалкогольном напитке в работе [18] разработали и применили метод, основанный на применении высокоэффективной жидкостной хроматографии и спектрофотометрического метода. Хроматографическое определение E110 осуществлялось на колонке из нержавеющей стали размером 0.25 м x 4.6 мм, заполненной октадецилсилильным силикагелем для хроматографии типа Zorbax Eclipse XDB-C18 с размером частиц 5 мкм. Применяли подвижную фазу: ацетонитрил: вода: фосфорная кислота (80:20:0.4).

Авторы работы [19] проводят одновременное определение 8 красителей в конфетах и напитках с помощью обращено-фазовой хроматографии с градиентным элюированием. Подвижная фаза состоит из растворителя А (ацетат аммония 0.1M) и растворителя В (смесь метанола и ацетонитрила). Определение концентраций красителей проводят с помощью УФ-детектора.

Определению семи красителей в вине, в том числе E102, E133 посвящена работа [20]. В качестве растворителей А и В используют ацетат аммония и метанол соответственно. Для количественной

оценки содержания красителей в образцах также применяют УФ-детектор. Также для определения содержания красителей в смеси может применяться диодно-матричный [21] и масс-спектрометрический детекторы [22].

Резюмируя вышесказанное можно сделать заключение, что на сегодняшний день достаточно сложно найти методику пробоподготовки и анализа сточных вод с повышенной минерализацией на содержание синтетических красителей методом ВЭЖХ, хотя данный метод широко применяется для других объектов анализа. Целью данной работы являлась разработка методики анализа синтетических красителей в сточных водах предприятий с повышенным содержанием неорганических солей методами обращено-фазовой ВЭЖХ с диодно-матричным детектированием.

Экспериментальная часть

Реактивы, материалы, оборудование.

В качестве объектов исследования были использованы синтетические пищевые красители: тартразин (E102), хинолиновый желтый (E104), желтый «солнечный закат» (E110), кармуазин (E122), понсо 4R (E124), очаровательный красный (E129), патентованный голубой (E131), бриллиантовый голубой (E133), зеленый (E142), черный блестящий (E151) (все вышеупомянутые красители приобретены у ООО «Динамик»). Для приготовления подвижных фаз использовали деионизированную воду марки В по ОСТ 11 029.003-80, ацетонитрил марки ЧДА и навеску соли ацетата аммония марки ЧДА.

Хроматографическое разделение СПК осуществлялось с помощью жидкостного хроматографа Azura с диодно-матричным детектором. на обращено-фазовой колонке Kromasil 100-5-C18(w) (4.6 × 250 мм) в режиме градиентного элюирования.

В качестве подвижной фазы использовали следующие растворы: Линия А –

буферный раствор (раствор аммония уксуснокислого концентрацией 0.1 моль/дм³: ацетонитрил = 90:10%), линия В – раствор ацетонитрила (ацетонитрил : вода = 90:10%).

В буферный раствор на этапе приготовления добавляется 10% органической составляющей во избежание образования пузырьков воздуха в момент смешения воды и ацетонитрила в хроматографической системе. Аналогично 10% воды добавляется в ацетонитрил (линию В).

В результате многочисленных экспериментов по оптимизации разделения были подобраны оптимальные условия градиентного элюирования [9]. Особенностью данной методики является промывка и кондиционирование колонки в конце каждого анализа. В данном случае это происходит относительно быстро за счёт того, что неподвижная фаза С18 на основе силикагеля быстро приходит в адсорбционное равновесие, что позволяет удалять неидентифицируемые примеси веществ после каждого анализа. Это полезно при анализе реальных объектов, которые будут содержать синтетические красители.

Хроматографический анализ проводили на хроматографе AZURA с диодно-матричным детектором. В результате анализа каждого из аналитов были получены спектры красителей, а также определены максимумы поглощения для каждого из используемых веществ.

Градуировка. Для градуировки хроматографа использовали растворы красителей в деионизированной воде концентрациями 1, 3, 5, 8, 10 мг/дм³. Для оценки степени концентрирования готовили раствор концентрацией 0.01 мг/дм³. Хроматограмма данного раствора была аналогична хроматограмме чистой деионизированной воды.

Концентрирование красителей из сточной воды на патронах для твердофазной экстракции. Для удаления взвешенных частиц образец сточной воды фильтровался через бумажный фильтр «синяя

лента». Далее проводилась твердофазная экстракция на концентрирующем патроне.

В диссертации [23] описана методика концентрирования синтетических красителей с помощью патронов типа Диапак А, содержащих оксид алюминия в качестве сорбента. Аналогичная методика описана в ГОСТ [24]. Однако, так как в нашем случае матричный раствор сточной воды может содержать большое количество щелочей, органических и неорганических солей, кислот и тяжелых металлов [25], полярные сорбенты не подойдут для анализа сточной воды. Для исследования сорбции красителей на патроне для твердофазной экстракции были выбраны 2 типа патронов: 1) Диапак П и 2) Диапак С16М.

Работа с концентрирующими патронами происходит в 4 этапа: кондиционирование, сорбция, промывка и элюирование.

После этапа кондиционирования проводили сорбцию на патронах. 500 см³ стандартного раствора концентрацией 0.01 мг/дм³ пропускали через патрон. Далее промывали патрон деионизированной водой, смывы отбрасывали. Далее проводили элюирование синтетических красителей ацетоном и упаривание полученного раствора. Красители являются термически устойчивыми, что позволяет упаривать их растворы в жестких условиях.

После упаривания сухой остаток растворялся в растворе А. Полученный раствор дозировали при помощи крана-дозатора жидкостного хроматографа. Первым этапом исследования процесса пробоподготовки было исследование влияния рН водной матрицы на сорбцию красителей. Для этого проводили концентрирование стандартных растворов красителей при 3 вариантах рН: 3.0; 4.0; 6.0.

После выбора оптимального рН раствора для каждого концентрирующего патрона проводилась твердофазная экстракция красителей из модельной смеси

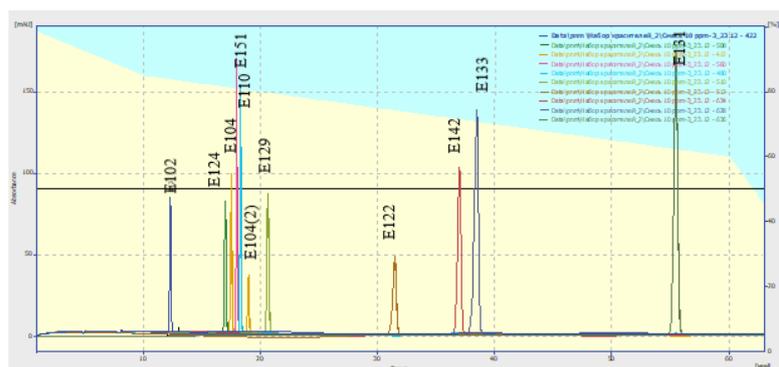


Рис. 1. Хроматограмма раствора пищевых красителей концентрацией 10 мг/дм³
 Fig. 1. Chromatogram of a solution of food dyes with a concentration of 10 mg/l

Таблица 1. Максимумы поглощения и времена удерживания СК
 Table 1. Maximum absorption and retention times of SFs.

№	Е номер красителя	Максимум поглощения, нм	Время уд. [мин]
1	E102	422	12.3
2	E124	508	17.0
3	E104	412	17.5
4	E151	580	18.0
5	E110	480	18.3
3(2)	E104 (2)	412	19.0
6	E129	510	20.6
7	E122	512	31.6
8	E142	634	37.1
9	E133	628	38.5
10	E131	636	55.5

сточной воды. Концентрация стандартного раствора и методика концентрирования была аналогичной.

Обсуждение результатов

Хроматограмма раствора СК концентрацией 10 мг/дм³ представлена на рисунке 1. Диодно-матричный детектор позволяет записывать сигнал при длинах волн от 190 до 700 нм. На хроматограмму выведены максимумы поглощения для всех красителей.

Время удерживания соответствующих пиков каждого из красителей приведены в таблице 1.

Для удобства восприятия на хроматограмме показаны пики красителей только при максимуме их поглощения. Мешающие для восприятия возмущения пиков красителей при близких к максимуму длин волн были удалены.

В данном хроматографическом разделении в отличие от методики [1], где также как и здесь, используется ацетатный буфер, не используется метанол, что, несомненно, является преимуществом, так как метанол в сочетании с водными растворами образует высоковязкие смеси, которые заметно повышают рабочее давление системы [9].

Пики E151 и E110 при концентрации раствора 10 мг/дм³ частично перекрываются при данном режиме, однако при максимуме светимости E151 не наблюдается пика красителя E110 и аналогично для красителя E110, при его максимуме поглощения не происходит детектирование красителя E151.

Результаты концентрирования стандартных растворов красителей концентрацией 0.01 мг/дм³. При концентрировании 500 см³ раствора концентрацией 0.01 мг/дм³ максимальная возможная

Таблица 2. Результаты анализа растворов 0.01 мг/дм³ после концентрирования при различных значениях рН

Table 2. Results of the analysis of 0.01 mg/dm³ solutions after concentrating at different pH values

Аналит	Концентрация, мг/дм ³ Диапак П рН=3.0	Концентрация, мг/дм ³ Диапак П рН=4.0	Концентрация, мг/дм ³ Диапак П рН=6.0	Концентрация, мг/дм ³ Диапак С16М рН=3,0	Концентрация, мг/дм ³ Диапак С16М рН=4.0	Концентрация, мг/дм ³ Диапак С16М рН=6.0
E102	1.9	1.9	0.1	0.4	0.1	0.1
E104	2.2	5.0	1.6	2.4	0.8	0.1
E124	0.4	3.4	0.0	0.7	0.1	0.1
E151	2.3	4.5	1.2	0.8	0.2	0.1
E110	2.0	4.9	1.3	1.0	0.3	0.0
E129	2.1	3.8	1.5	4.2	2.3	0.3
E122	1.6	3.7	1.4	3.8	3.4	0.8
E142	2.6	4.2	2.1	4.7	4.2	4.9
E133	0.9	3.9	1.4	4.1	4.1	4.6
E131	2.7	4.8	2.2	4.5	3.1	5.0

концентрация 5.0 мг/дм³, так как конечный сухой остаток растворяется в 1 см³ подвижной фазы. В таблице 2 представлены результаты сорбции синтетических красителей на концентрирующих патронах Диапак П и Диапак С16М при различных значениях рН.

Анализируя данные представленные в таблице 2, можно сделать вывод о том, что красители концентрируются не в полной мере. Для патрона Диапак П наилучшие показатели степени концентрирования для всех исследуемых красителей наблюдается при рН=4. Концентрирующий патрон Диапак С16М показал себя наилучшим образом при концентрировании более кислого раствора при рН=3. Однако для E102, 124, 151, 110 наблюдается очень низкие степени концентрирования, это, вероятнее всего, связано с тем, что гидрофильные молекулы данных красителей слабо удерживаются на неполярном сорбенте патрона С16М. Для красителей E122, E133, E131 степени концентрирования составили приблизительно столько же сколько для патрона Диапак П. А для красителей E129 и E142 даже больше чем на патроне Диапак П. В таблице 3 представлены степени концентрирования при различных рН растворов.

Эксперименты с модельной смесью сточной водой проводили для патрона Диапак П с рН пробы = 4, а для патрона Диапак С16 при рН=3.

Результаты концентрирования проб сточной воды с содержанием красителей 0.01 мг/дм³ представлены в таблице 4.

Сточная вода не подходит для концентрирования методом упаривания растворителя, так как при упаривании образуется большое количество минеральных солей, которые будет невозможно растворить в небольшом количестве подвижной фазы.

Как видно из данных, приведённых в таблице степень концентрирования для патрона Диапак П значительно ниже, чем для стандарта, приготовленного на дистиллированной воде. Однако, концентрирование практически всех красителей близко к 50%, это значит, что, взяв для концентрирования 500 см³ сточной воды и, в конечном итоге, перерастворив пробу в 1 см³ для проведения анализа, практически все красители сконцентрируются в 250 раз.

Степень концентрирования красителей из минерализованной воды на патроне Диапак С16М составила не более 22%, вероятно это связано с тем, что

Таблица 3. Степени концентрирования синтетических красителей на патронах Диапак П и С16М при различных значениях рН матрицы.

Table 3. Degrees of concentration of synthetic dyes on Diapak P and C16M cartridges at different pH values of the matrix

Аналит	Степень концентрирования, % Диапак П рН=3.0	Степень концентрирования, % Диапак П рН=4.0	Степень концентрирования, % Диапак П рН=6.0	Степень концентрирования, % Диапак С16 рН=3.0	Степень концентрирования, % Диапак С16 рН=4.0	Степень концентрирования, % Диапак С16 рН=6.0
Е102	39	37	2	8	2	1
Е104	45	99	32	47	16	2
Е124	9	68	1	14	2	2
Е110	40	98	26	20	6	1
Е129	43	76	30	84	47	7
Е122	32	74	28	76	69	16
Е142	52	84	42	94	84	98
Е133	17	78	29	81	82	93
Е131	53	96	45	90	62	100

Таблица 4. результаты концентрирования синтетических красителей из сточной воды

Table 4. Results of concentrating synthetic dyes from wastewater

Аналит	Концентрация мг/дм ³ Диапак П, рН=4.0 сточная вода	Степень концентрирования, % Диапак П, рН=4.0 сточная вода	Концентрация мг/дм ³ С16М, рН=3.0 сточная вода	Степень концентрирования, % Диапак С16М, рН=3.0 сточная вода
Е102	1.2	24	0,6	12
Е104	2.8	56	1,1	22
Е124	0.8	16	0,1	2
Е110	2.7	54	0,7	15
Е129	2.9	58	0,9	18
Е122	2.8	57	0,6	11
Е142	1.8	36	0,2	4
Е133	1.7	33	0,8	16
Е131	2.0	41	0,2	3

сточная вода имеет большую элюирующую силу по сравнению с водой с низким содержанием неорганических солей, это способствует быстрому смыву красителей, в следствии чего наблюдаются низкие степени концентрирования. Следовательно, патрон Диапак С16М не подходит для твердофазной экстракции синтетических красителей из сточной воды.

Валидация методики определения синтетических красителей. Данные, которые использовали для оценки прецизионности и расширенной неопределённости измерений были получены при анализе и

пробоподготовке стандартных растворов синтетических красителей в модельной смеси сточной воды. Рассматриваемый диапазон концентраций стандартных растворов от 0.005 до 0.05 мг/дм³. Было проведено по 9 определений (n=2) для каждого раствора, с двумя меняющимися факторами: время и оператор. Результаты приведены в таблице 5.

Предел повторяемости рассчитывали по формуле 1.

$$r = Q(P, n)\sigma_r \quad (1)$$

где $Q(P, n)$ – коэффициент, зависящий от числа n результатов единичного анализа,

Таблица 5. Относительные значения пределов повторяемости и промежуточной прецизионности, расширенной неопределенности при уровне доверительности $P = 0.95$

Table 5. Relative values of repeatability and intermediate precision limits and expanded uncertainty at the confidence level $P = 0.95$

Аналит	Предел повторяемости r , %	Предел промежуточной прецизионности R , %	Расширенная неопределенность измерения U , %
E102	2.14	2.78	7.13
E104	1.89	2.46	6.23
E124	3.84	4.99	8.73
E110	2.04	2.65	6.91
E129	1.83	2.38	6.15
E122	1.92	2.50	6.38
E142	3.47	4.51	8.62
E133	3.21	4.17	8.36
E131	2.30	2.99	7.59

полученных в условиях повторяемости, и доверительной вероятности P (значения коэффициентов для принятой вероятности $P=0.95$ и $n=2$ равен 2.77, σ_r – СКО повторяемости, принимаемое как СКО результатов анализа параллельных проб.

Предел промежуточной прецизионности R рассчитывали по формуле 2.

$$R = Q(P, n)\sigma_{Rm} \quad (2)$$

где σ_{Rm} – показатель воспроизводимости методики анализа в виде СКО, который рассчитывали по формуле 3.

$$\sigma_{Rm} \approx kS_r \quad (3)$$

где S_r – выборочное СКО результатов анализа, k – коэффициент, который принимать значения от 1.2 до 2.0.

Расширенная неопределенность измерения U рассчитывали, как корень квадратный из сумм составляющих неопределенностей.

$$U = \sqrt{(u_a^2 + u_b^2)} \quad (4)$$

где u_a^2 – стандартная неопределенность пробоподготовки, u_b^2 – стандартная неопределенность хроматографического анализа. u_a , u_b рассчитываются как абсолютная погрешность измерения, деленная на $\sqrt{3}$.

Заключение

В результате проведенных исследований была разработана методика анализа 10 синтетических красителей в сточных

водах повышенной минерализации, содержащей органические гидрофобные примеси. Методика заключается в твердофазной экстракции красителей из сточной воды, с последующим определением концентраций красителей методом обращенно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии с диодноматричным детектированием. Наибольшая степень извлечения синтетических красителей из сточных вод достигается при использовании концентрирующих патронов Диапак П при рН концентрируемой пробы равной 4. Нижний предел измерения методики составляет 2-5 мкг/дм³ для синтетических красителей (за исключением E102 и E124) и 10 мкг/дм³ для E102 и E124. Данная методика применима для анализа сточных вод текстильно-красочной промышленности (пищевой промышленности). Максимальная расширенная неопределенность результата измерения составила 8.73 % на нижнем уровне диапазона измерения для наименее концентрируемого красителя E124. Данная методика может использоваться для аналитического контроля за содержанием красителей в сточных водах пищевых производств.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет из-



вестных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые

могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы/References

1 Ghaly A. E., Ananthashankar R., Alhattab M., Ramakrishnan V.V. Production, Characterization and Treatment of Textile Effluents: A Critical Review. *J Chem Eng Process Technol.* 2014; 5(1): 18.

2 Raman C.D., Kanmani S. Textile dye degradation using nano zero valent iron: A review. *Journal of Environmental Management.* 2016; 177(15): 341-355.

3 Akpan U.G., Hazard J. Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO₂-based photocatalysts: a review. *Journal of Hazardous Materials.* 2009; 170: 520-529.

4 Ali S.W., Mirza, M.L., Bhatti T.M. Removal of Cr (VI) using iron nanoparticles supported on porous cation-exchange resin. *Hydrometallurgy. Journal of Hydrometallurgy.* 2015; 157: 82-89.

5 Batool S., Akib S., Ahmad M., Balkhair K.S., Ashraf M.A. Study of modern nano enhanced techniques for removal of dyes and metals. *Journal of Nanomater.* 2014; 1-20.

6 Tratnyek P.G., Johnson R.L. Nanotechnologies for environmental cleanup. *Journal of Nano Today.* 2006; 1: 44-48.

7 Robinson T., McMullan G. Marchant R., Nigam P. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Journal of Bioresour. Technol.* 2001; 77: 247-255.

8 Satapanajaru T., Chompuchan C., Suntornchot P., Pengthamkeerati P. Enhancing decolorization of reactive black 5 and reactive red 198 during nano zerovalent iron treatment. *Journal of Desalination.* 2011; 266: 218-230.

9 Styskin E.L., Icikson L.B., Braude E.V. Prakticheskaja vysokoeffektivnaja zhidkostnaja hromatografija. M. 1986. 284 p. (In Russ.)

10 GOST 33406-2015. Produkcija alkohol'naja, bezalkogol'naja i sokovaja, dobavki vkusoaromaticheskie. Opređenje sodержaniija sinteticheskikh krasitelej metodom vysokoeffektivnoj zhidkostnoj hromatografii. Minsk: Gosstandart. 2017. P. 10. (In Russ.)

11 GOST 31504-2012. Moloko i molochnaja produkcija. Opređenje sodержaniija konservantov i krasitelej metodom VJeZhH. Minsk: Gosstandart. 2013. P. 18. (In Russ.)

12 MVI MN 2399-2005. Metodika opredelenija sinteticheskikh krasitelej v alkohol'nyh i bezalkogol'nyh napitkah s pomoshh'ju vysokoeffektivnoj zhidkostnoj hromatografii. Cvid-vo ob attestacii № 380/2005 ot 07.12.2005. Minsk: GU «Resp. nauch.-prakt. centr gigeny». 2005. P. 11. (In Russ.)

13 Instrukcija po primeneniju Reg. № 108-1006, utv. 05.01.2007. Metodika opredelenija sinteticheskikh krasitelej v konditerskikh i hlebobulochnyh izdelijah, molochnyh produktah, sokah, biologicheskii aktivnyh i pishhevnyh dobavkah s pomoshh'ju VJeZhH. Minsk: Respublikanskij nauchno-prakticheskij centr gigeny. 2007. P.11. (In Russ.)

14 Kiseleva M.G., Pimenova V.V., Eller K I. Optimization of Conditions for the HPLC Determination of Synthetic Dyes in Food. *Journal of Analytical Chemistry.* 2003; 58(7): 685.

15 Sychev K. Prakticheskij kurs zhidkostnoj hromatografii. M., KOKORO. 2013. 272 p. (In Russ.)

16 GOST 34229-2017 Produkcija sokovaja. Opređenje sinteticheskikh krasitelej metodom vysokoeffektivnoj zhidkostnoj hromatografii. Moskva: Standartform. 2018. P. 21. (In Russ.)

17 Poljanskih E.I., Belysheva L.L., Fedorova T.A., Filatchenkova E.V., Pleshak E.M. Metodika kontrolja sodержaniija sinteticheskikh krasitelej v pishhevoj produkcii.



Himicheskaja bezopasnost'. 2019; 3(1): 154-169. (In Russ.)

18 Malinka E.V., Egorova A.V., Anel'chik A.V., Antonovich V.P. Opredelenie sinteticheskogo pishhevogo krasitelja E110 v bezalkogol'nom napitke. *Himicheskaja nauka i tehnologija*. 2015; 1(30): 29-33. (In Russ.)

19 Mazdeh F.Z., Khorrami A.R., Moradi-Khatoonabadi Z., Aftabdari F.E., Shams Ardekani M.R., Moghaddam G., Hajimahmoodi M. Determination of 8 synthetic food dyes by solid phase extraction and reversed-phase high performance liquid chromatography. *Trop. J. Pharm. Res.* 2016; 15(1): 173-181.

20 Zhang Y., Zhou H., Wang Y., Wu X., Zhao Y. Simultaneous determination of seven synthetic colorants in wine by dispersive micro-solid-phase extraction coupled with reversed-phase high performance liquid chromatography. *J. Chromatogr. Sci.* 2015; 53: 210-218.

21 Pagáčiková D., Lehotay J. Determination of synthetic colors in meat products using high performance liquid chromatography with photodiode array detector. *J. Liq.*

Chromatogr. Related Technol. 2015; 38: 579-583.

22 Zou T., He P., Yasen A., Li Z. Determination of seven synthetic dyes in animal feeds and meat by high performance liquid chromatography with photodiode array and tandem mass detectors. *Food Chem.* 2013; 138: 1742-1748.

23 Ramazanova G.R. Diss. kand. him. nauk. M., 2016, 186 p. (In Russ.)

24 GOST – 32050-2013. Metody identifikacii i opredelenija massovoj doli sinteticheskikh krasitelej v karameli. Moskva: Standartinform. 2014.P. 27. (In Russ.)

25 Odincova O.I., Kozlova O.V., Kuvaeva E.Ju. Tekstil'no-vspomogatel'nye veshhestva v processah krashenija tekstil'nyh materialov: ucheb. Posobie. Ivan. Gos. himiko-tehnologicheskij universitet. Ivanovo, 2017. 160 p. (In Russ.)

26 Vasijarov G.G., Alekseeva G. S. Koncentrirujushhie patrony diapak. Moskva, 2018. 51 p. (In Russ.)

27 MI 2881-2004 Metodiki kolichestvennogo himicheskogo analiza. Procedury proverki priemlemosti rezul'tatov analiza. FGUP «UNIIM». 2004. 25 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

И.А. Платонов – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой химии Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

И.М. Муханова – к.х.н., доцент кафедры химии Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

М.Ю. Лабаев – аспирант кафедры химии Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

А.А. Салтанова – студент кафедры химии Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

I.A. Platonov – prof., grand Ph.D (technical sciences), Head of the department of chemistry, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, e-mail: pia@ssau.ru

I.M. Muhanova – candidate of Chemical Sciences. Associate Professor of the chemistry Department, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, e-mail: mim042004@mail.ru

M.Y. Labaev – the postgraduate student of the Department of Chemistry, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, e-mail: maxlabaev@gmail.com

A.A. Saltanova – student of the Department of Chemistry, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, e-mail: saltanovaalena324@gmail.com

Статья поступила в редакцию 18.03.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 17.04.2024.

The article was submitted 18.03.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 17.04.2024.