

УДК 543.4: 543.7

## ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЧЕВИНЫ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ

Е.М. Басова\*, М.А. Буланова\*, В.М. Иванов

(кафедра аналитической химии; e-mail: mvonavi@mail.ru)

**Разработан фотометрический метод определения мочевины с использованием в качестве реагента *n*-диметиламинобензальдегида. Метод позволяет надежно определять 10 мг/л мочевины при объеме аликвотной части 10 мл. Методика применена для определения мочевины в речной воде.**

**Ключевые слова:** мочевина, *n*-диметиламинобензальдегид, природная вода, фотометрическое определение.

Индикаторный метод исследования межскважинного пространства нефтяной залежи широко используют в геофизике для контроля процесса вытеснения нефти нагнетаемой водой [1]. Метод основан на введении через нагнетательные скважины в изучаемый пласт заданного объема меченной индикатором жидкости, оттеснении ее нагнетаемой водой к подконтрольным добывающим скважинам и исследовании изменения во времени концентрации индикатора в выходящем из пласта потоке жидкости. Результаты индикаторных исследований используют для создания геологических и гидродинамических моделей нефтяных месторождений, подсчетов запасов нефти, составления проектов для разработок месторождений. Поскольку при движении индикатора по пласту происходит разбавление до  $10^4$  раз, необходимо иметь методику контроля его содержания на уровне 1 мг/л.

В качестве индикаторов широко используют флуоресцентные красители, фосфат-, тиоцианат- и нитрат-ионы [1]. Мочевина отвечает всем требованиям, предъявляемым к индикаторам в геофизических исследованиях [1]: хорошо растворима в воде, не влияет на процессы переработки нефти, экологически безопасна, дешева, что обеспечивает экономическую эффективность индикаторных исследований. Мочевину как индикатор используют в Республике Беларусь. Одновременно используют еще 3-4 индикатора, что требует методик селективного определения каждого из них и отсутствия мешающего влияния со стороны других индикаторов.

Методов определения мочевины немного. Общее содержание азота в готовой продукции контролируют титриметрически после разложения мочевины концентрированной  $H_2SO_4$  и перевода ее в ион аммония [2]. Масса пробы составляет 1 г при определении  $NH_4^+$  формальдегидным методом и 5 г при использовании предварительной отгонки аммиака. Титриметрический метод анализа не пригоден для определения низкого содержания мочевины.

Определение мочевины в крови, моче и других биологических жидкостях основано на количественном переводе ее в карбонат аммония при помощи фермента уреазы с последующим спектрофотометрическим определением ионов  $NH_4^+$  реактивом Несслера [2, 3]. Методика позволяет определять 5–20 г/л мочевинового азота [3]. Органический азот в природных и сточных водах также определяют реактивом Несслера после разложения концентрированной  $H_2SO_4$  [3, 4].

При анализе природных вод рекомендуемый объем пробы должен составлять 500 мл, при этом аммиак предварительно отгоняют из щелочного раствора [3]. При анализе сточных вод достаточно 100 мл образца, а определение проводят прямое (без отгонки) [3]. Спектрофотометрическое определение ионов аммония реактивом Несслера достаточно чувствительно – от 0,05 до 4,00 мг/л в природных и сточных водах, для анализа необходимо до 50 мл пробы [5]. Поскольку образцы и природных вод, и биологических жидкостей уже содержат аммонийный азот, его концентра-

\* Международный университет природы, общества и человека «Дубна».

цию необходимо установить предварительно, а затем вычесть из концентрации, полученной после разложения мочевины. Неудобством методики является необходимость работы с безаммиачной водой (как один из способов бидистиллированную воду пропускают через колонку с катионообменником КУ-2).

Большой интерес представляет прямое спектрофотометрическое определение мочевины. Для обнаружения мочевины используют появление желто-зеленого окрашивания при взаимодействии определяемого раствора с *n*-диметиламинобензальдегидом (ДМАБА) в присутствии HCl, предел обнаружения 2 мг/л [6]. Методика спектрофотометрического определения мочевины в пластовых водах с помощью ДМАБА выложена в Интернете на аналитическом форуме ANCHEM.RU и характеризуется минимально определяемой концентрацией (2 мг/л) [7]. Образование желтого соединения мочевины с ДМАБА лежит в основе методики определения массовой доли амидного азота в удобрениях, диапазон определяемых содержаний 20–46 мас.% [8]. При этом для построения градуировочного графика в колбы емкостью 100 мл вводили 160–320 мг мочевины. Таким образом, методика [8] позволяет анализировать водные образцы с концентрацией 1,8–3,6 г/л, что на три порядка выше, чем в методике [7].

Цель настоящей работы – оценка достоверности сведений из Интернета и разработка методики определения мочевины в природных водах спектрофотометрическим методом с использованием ДМАБА.

### Экспериментальная часть

**Реагенты.** Использовали мочевину квалификации «ч.» («ЭКРОС», Россия), ДМАБА «ч.д.а.» («Лабораторная техника», Россия), CH<sub>3</sub>COOH с содержанием основного вещества 99,5% («Panreac», Испания), конц. HCl «ч.д.а.» («ЭКРОС», Россия). В работе использовали дистиллированную воду.

**Растворы.** Стандартный (2,5 г/л) раствор мочевины готовили растворением точной навески препарата в воде. Рабочий раствор с концентрацией мочевины 250 мкг/мл готовили разбавлением исходного стандартного раствора водой.

Для приготовления раствора ДМАБА 20 (или 40) г реагента растворяли в 50 (или 100) мл конц. HCl в мерной колбе емкостью 1 л, разбавляли водой до метки и перемешивали. На следующий день раствор фильтровали. Разбавленный раствор соляной кислоты

готовили разбавлением 5 мл концентрированного в мерной колбе емк. 100 мл водой.

**Аппаратура.** Оптическую плотность растворов измеряли на фотометрах КФК-2МП или КФК-3 при 400 или 440 нм соответственно в кюветах с  $l = 5$  см относительно раствора контрольного опыта.

**Методика эксперимента.** В мерные колбы емкостью 25 мл вводили последовательно растворы мочевины, ДМАБА, уксусной кислоты, HCl (если необходимо), разбавляли водой до метки и перемешивали. Измеряли оптическую плотность растворов относительно контрольного раствора.

### Результаты и их обсуждение

**Воспроизведение методики из Интернета [7].** Растворы содержали 15 мл воды, 10 мл реагента ДМАБА с концентрацией 20 г/л и 5 мл CH<sub>3</sub>COOH, общий объем растворов составил 35 мл. Зависимость оптической плотности от концентрации мочевины в воде приведена в табл. 1. Она линейна, описывается уравнением  $A = 0,00324c$  с коэффициентом корреляции  $r = 0,998$ , однако значения оптической плотности очень низкие. Следовательно, минимально определяемая концентрация мочевины не может составлять 2 мг/л, как указано в работе [7]. Реально надежно можно анализировать образцы воды с концентрацией мочевины более 15 мг/л.

**Выбор оптимальных условий образования комплекса мочевины с ДМАБА.** Соединение мочевины с ДМАБА имеет максимум поглощения при 420 нм [8]. Показано, что на КФК-2МП поглощение раствора максимально при использовании светофильтра с длиной волны пропускания 400 нм, а на КФК-3 – 440 нм.

Изучено влияние концентрации ДМАБА, HCl и CH<sub>3</sub>COOH на оптическую плотность, результаты представлены в табл. 2. Видно, что введение CH<sub>3</sub>COOH повышает оптическую плотность раствора в 1,5 раза. Следует отметить, что в методике [8] эту кислоту в раствор не добавляли. Оптимальное содержание конц. CH<sub>3</sub>COOH составляет 5 мл. Вводить HCl дополнительно нецелесообразно.

Таблица 1

Зависимость оптической плотности от концентрации мочевины в воде

<i>c</i> , мг/л	1	5	10	15	20	25
<i>A</i> (400 нм)	0,005	0,016	0,033	0,046	0,068	0,080

Т а б л и ц а 2

Влияние количества реагентов на образование окрашенного соединения мочевины с ДМАБА (общий объем раствора 25 мл, 20 г/л ДМАБА,  $l = 5$  см, 400 нм, КФК-2МП)

Введено мочевины, мг	Введено, мл			A
	ДМАБА	CH <sub>3</sub> COOH	HCl	
1,250	2,00	7,00	0	0,050
	4,00	7,00	0	0,042
	6,00	7,00	0	0,114
	8,00	7,00	0	0,113
	10,00	7,00	0	0,150
	12,00	7,00	0	0,162
	14,00	7,00	0	0,238
0,500	2,00	5,00	8,00	0,015
	4,00	5,00	6,00	0,060
	5,00	5,00	5,00	0,100
	6,00	5,00	4,00	0,122
	7,00	5,00	3,00	0,122
	8,00	5,00	2,00	0,127
	10,00	5,00	0	0,095
	12,00	5,00	0	0,175
	16,00	5,00	0	0,170
	18,00	5,00	0	0,180
0,500	6,00	5,00	4,00	0,122
	6,00	5,00	6,00	0,103
	6,00	5,00	10,00	0,080
0,500	6,00	3,00	4,00	0,114
	6,00	5,00	4,00	0,122
	6,00	7,00	4,00	0,112
	6,00	10,00	4,00	0,093
1,250	14,00	0	0	0,153
	14,00	7,00	0	0,238
0,250	12,00	0	0	0,080
	12,00	5,00	0	0,120

Зависимость оптической плотности от концентрации ДМАБА имеет сложный характер: можно четко выделить два плато в диапазоне 6–8 мл и 12–18 мл раствора ДМАБА с концентрацией 20 г/л. При этом введение большего количества реагента приводит к увеличению оптической плотности раствора, что должно позволить определять меньшие концентрации

мочевины. В качестве оптимальных выбраны 7 и 12 мл раствора ДМАБА (20 г/л). Поскольку введение большего объема раствора реагента приводит к уменьшению объема водного раствора, содержащего мочевины, был приготовлен раствор ДМАБА с концентрацией 40 г/л, оптимальный объем которого составляет 6 мл.

Изучено изменение оптической плотности раствора комплекса при стоянии. Показано, что оптическая плотность раствора постоянна в течение 5 мин после смешения растворов для обеих концентраций реагента, затем несколько снижается. Так, в растворе, содержащем 7 мл ДМАБА (20 г/л), через 45 мин оптическая плотность снизилась на 11%. В растворе, содержащем 6 мл ДМАБА (40 г/л), через 15 мин оптическая плотность уменьшилась на 6%, а через 25 мин – на 8%. Поэтому оптическую плотность растворов следует измерять в течение 5 мин после приготовления.

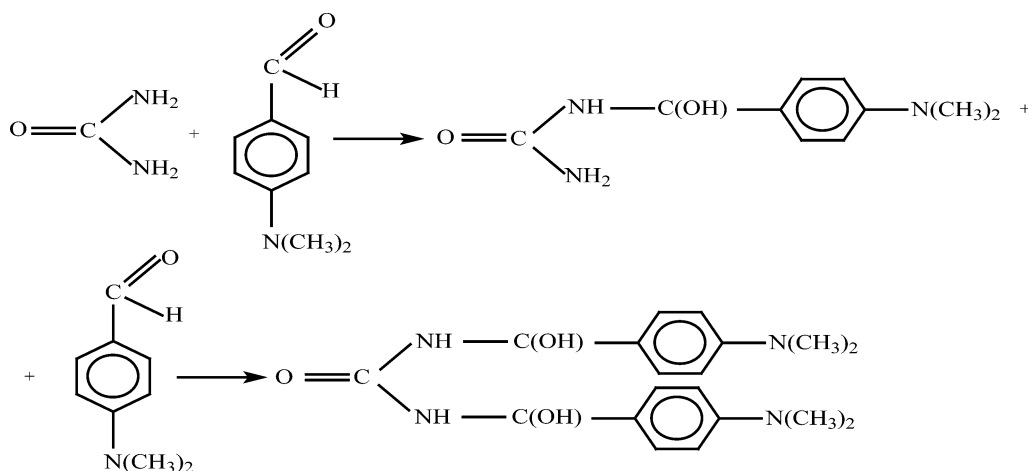
**Реакция образования комплекса мочевины с ДМАБА.** Изучена стехиометрия компонентов при образовании комплекса методом молярных отношений [9]. Для этого построена зависимость оптической плотности растворов с постоянной концентрацией ДМАБА, равной 0,01072 М, от концентрации мочевины (табл. 3).

Видно, что точка излома на кривой насыщения нечеткая, молярное соотношение ДМАБА и мочевины, полученное экстраполяцией прямолинейных участков кривой до взаимного пересечения, равно 2,08:1,0, что близко к 2:1. Нечеткий излом на кривой насыщения свидетельствует о незначительной устойчивости образующегося комплекса.

Мочевина обладает свойствами нуклеофила, слабого основания [10]. Реакции карбонильных соединений с основаниями катализируют как сильные, так и слабые кислоты [11]. Взаимодействие между мочевиной и ДМАБА можно представить следующей схемой.

Поскольку мочевина является слабым основанием ( $pK_b = 13,82$ ), оттягивание электронов карбонильной группы катализирующей кислотой необходимо для увеличения реакционной способности карбонильной группы по отношению к нуклеофилу – атому азота мочевины. Следовательно, реакция должна протекать только в кислой среде. Однако в сильноокислой среде происходит преимущественное протонирование нуклеофильного реагента (мочевина протонируется по атому кислорода, а не азота [10]) и уменьшение реакци-

Схема



онной способности свободной электронной пары, что и приводит к снижению степени образования комплекса – понижению оптической плотности раствора при увеличении концентрации HCl и CH<sub>3</sub>COOH (табл. 2). Значительно уменьшить концентрацию HCl или заменить ее уксусной кислотой не удастся, поскольку она необходима для растворения реагента. В работе [8] для приготовления 1 л раствора ДМАБА (4 г/л) использовали 40 мл конц. HCl.

Несмотря на то, что стехиометрия образующегося комплекса мочевины с ДМАБА отвечает молярному соотношению 1:2, избыток реагента, необходимый для достижения постоянной оптической плотности при фиксированном содержании мочевины 500 мкг, велик – 96- и 193-кратный для первого и второго плато соответственно (табл. 2). Вероятно, в области первого плато доминирует комплекс 1:1, а в области второго – 1:2. Различия в константах устойчивости комплексов незначительны, поэтому при построении кривой насыщения были получены не две точки пересечения, а только одна.

#### **Метрологические характеристики методики.**

Для построения градуировочных графиков в колбы

емкостью 25 мл вводят рабочий раствор мочевины, 7 мл раствора ДМАБА (20 г/л) или 6 мл раствора ДМАБА (40 г/л), 5 мл CH<sub>3</sub>COOH, разбавляют водой до метки и перемешивают. В течение 5 мин измеряют оптическую плотность растворов при 400 нм (КФК-2МП) или 440 нм (КФК-3) в кюветах 5 см относительно раствора контрольного опыта. Градуировочные графики линейны в диапазоне до 750 мкг мочевины. Уравнения градуировочных графиков представлены в табл. 4. При построении градуировочных графиков использовали среднее значение из двух измерений. При определении 375 мкг мочевины относительное стандартное отклонение составляло 0,06 ( $n = 6$ , вводили 7,00 мл раствора реагента, оптическая плотность 0,125–0,141), а при определении 125 мкг – 0,12 ( $n = 6$ , вводили 7 мл раствора реагента, оптическая плотность 0,030–0,039).

Рассчитаны средние значения молярных коэффициентов поглощения для областей первого и второго плато (табл. 4), которые при 440 нм различаются почти в два раза, что также может свидетельствовать в пользу образования при высоких концентрациях реагента комплекса стехиометрии 1:2, поскольку окрас-

Таблица 3

**Зависимость оптической плотности растворов с постоянной концентрацией ДМАБА, равной 0,01072 М, от концентрации мочевины**

С мочевины, мг	1,25	2,50	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	20,00	25,00	30,00	37,50
A (440 нм)	0,102	0,230	0,400	0,530	0,616	0,694	0,723	0,737	0,750	0,760	0,766

Т а б л и ц а 4

## Градуировочные графики для определения мочевины

Прибор ( $\lambda$ , нм)	$V_{\text{ДМАБА}}$ , мл (с, г/л)	$m_{\text{мочевины}}$ , мкг	$A$	$n$	$\varepsilon$ , моль <sup>-1</sup> ·л·см <sup>-1</sup>	Уравнение	$r$
КФК-2МП (400)	7 (20)	125	0,042	6	78	$A = 0,00024m$	0,996
		250	0,067				
		375	0,096				
		500	0,119				
		625	0,152				
		750	0,164				
КФК-3 (440)	6 (40)	25	0,013	9	158	$A = 0,00051m$	0,973
		50	0,029				
		100	0,050				
		150	0,078				
		200	0,110				
		250	0,135				
		375	0,192				
		500	0,260				
		625	0,305				
		750	0,305				
КФК-3 (440)	7 (20)	125	0,041	6	97	$A = 0,000326m$	0,998
		250	0,081				
		375	0,123				
		500	0,162				
		625	0,204				
		750	0,245				

ка соединения обусловлена присутствием в молекуле структуры ДМАБА.

Приборы КФК-2МП и КФК-3 позволяют определять оптическую плотность в диапазоне 0,0–2,0. Значение оптической плотности, которое можно измерить с необходимой точностью ( $s_r < 0,33$ ), составляет порядка 0,01 [12]. Для использованных в работе кювет с  $l = 5$  см и рассчитанных значений молярного коэффициента поглощения (табл. 4) пределы обнаружения составляют 30 мкг (добавляют 7 мл раствора ДМАБА с концентрацией 20 г/л) или 20 мкг (добавляют 6 мл раствора ДМАБА с концентрацией 40 г/л). Рекомендуемый диапазон определяемых содержаний мочевины 100–750 мкг (в колбе емкостью 25 мл).

**Анализ объектов.** Методика применена для анализа образца речной воды методом «введено-найде-но». Проба речной воды была отобрана 23.11.2010 г. в Угличском водохранилище, р. Волга, г. Калязин (ФГБУ «Центррегионводхоз», Дубненская экоаналитическая лаборатория). На уровне десятков и единиц мг/л образец воды содержал ионы кальция, магния, сульфата, хлорида, нитрата и силиката; рН 7,39.

Полученный образец воды имел высокий показатель цветности – 46 градусов при ПДК для рыбохозяйственных водоемов – 20. Цветность определяли фотометрически при длине волны 436 нм [13]. Пока-

зано, что оптическая плотность 10 мл пробы, разбавленной до 25 мл водой, измеренная при 440 нм, равна 0,019 (среднее значение из двух измерений). Таким образом, при анализе природных образцов следует учитывать поглощение матрицы при выбранной длине волны.

**Выполнение определения.** Пробу анализируемой воды пропускают через фильтр «синяя лента». В колбы емкостью 25 мл вводят 10 мл образца, добавляют 6 мл раствора ДМАБА с концентрацией 40 мг/л (или 7 мл раствора ДМАБА с концентрацией 20 г/л), 5 мл  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , разбавляют водой до метки и перемешивают. В течение 5 мин измеряют оптическую плотность растворов при 400 или 440 нм в кюветах с  $l = 5$  см. Из полученного значения оптической плотности вычитают оптическую плотность, обусловленную цветностью исходной пробы. Для этого в колбу емкостью 25 мл вводят 10 мл анализируемой воды, добавляют 5 мл  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , разбавляют водой до метки, перемешивают и измеряют оптическую плотность относительно воды при 400 или 440 нм в кюветах с  $l = 5$  см.

Содержание мочевины в аликвотной части образца ( $m$ , мкг) находят по градуировочному графику. Концентрацию мочевины ( $c$ , мг/л) в образце рассчитывают по формуле:  $c = m/10$ . Результаты определения

Т а б л и ц а 5

Результаты определения мочевины в образцах методом «введено-найдено» ( $P = 0,95$ )

Матрица	Объем пробы, мл	$c$ , мг/л	Введено, мкг	$n$	Найдено, мкг	$c$ , мг/л	$s_r$	$D$ , %	Условия
Речная вода	10	10,0	100	3	103±7	10,3±0,7	0,03	+3	КФК-3, 440 нм, 6 мл ДМАБА (40 г/л)
	10	20,0	200	3	191±13	1,9±1	0,03	-4,5	
Дистиллированная вода	100	1,25	125	4	135±16	1,4±0,2	0,07	+8	КФК-3, 440 нм, 6 мл ДМАБА (40 г/л), упаривание
	100	3,75	375	3	336±54	3,4±0,5	0,06	-10,4	
Речная вода	100	5,0	500	3	467±48	4,7±0,5	0,04	-6,6	КФК-3, 440 нм, 7 мл ДМАБА (20 г/л), упаривание
	100	2,0	200	3	140±66	1,4±0,7	0,19	-30	

приведены в табл. 5. Методика позволяет надежно анализировать образцы с содержанием мочевины 10 мг/л и выше.

**Концентрирование.** Для снижения нижней границы определяемого содержания изучена возможность концентрирования. Самый простой способ концентрирования водных образцов – упаривание. Однако в кипящей воде мочевины гидролизуются с образованием аммиака и диоксида углерода, причем эту реакцию катализируют кислоты и основания [10]. Изучено упаривание модельного раствора, приготовленного с использованием дистиллированной воды. Упаривали до объема ~8 мл на электрической плитке, тщательно следя, чтобы не произошло выпаривания досуха. Как видно из данных табл. 5, погрешность определения мочевины в модельном растворе после упаривания не превышает 11%. После упаривания 100 мл речной воды с добавкой мочевины также получены удовлетворительные результаты (табл. 5). В последнем случае параллельно упаривали еще две пробы для учета вклада цветности исходного образца воды в оптическую плотность комплекса; среднее значение оптической плотности, обусловленное цветностью, составляло 0,111. Следует отметить, что рН анализируемого образца воды был близок к нейтральному. Если рН образца сильно отличается от нейтрального,

пробу необходимо отнейтрализовать для снижения каталитического действия ионов гидроксония или гидроксида.

**Выполнение определения с предварительным концентрированием упариванием.** Пробу анализируемой воды пропускают через фильтр «синяя лента», измеряют рН, если необходимо, по каплям добавляют разбавленные растворы HCl или NaOH до рН 6,5–7,5. 100 мл образца помещают в стакан емкостью 100–150 мл, упаривают на плитке до объема ~8 мл. Раствор количественно переносят в колбу емкостью 25 мл, ополаскивая 5 мл воды, добавляют 6 мл раствора ДМАБА (40 мг/л), 5 мл  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , разбавляют водой до метки и перемешивают. В течение 5 мин измеряют оптическую плотность растворов при 400 или 440 нм в кюветах ( $l = 5$  см). Из полученного значения оптической плотности вычитают оптическую плотность, обусловленную цветностью исходной пробы. Для этого 100 мл анализируемой воды упаривают на плитке до объема ~8 мл, переносят в колбу емкостью 25 мл, добавляют 5 мл  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , разбавляют водой до метки, перемешивают и измеряют оптическую плотность при 400 или 440 нм в кюветах 5 см относительно воды. Содержание мочевины в аликвотной части ( $m$ , мкг) находят по градуировочному графику. Концентрацию мочеви-

ны ( $c$ , мг/л) в исходном образце рассчитывают по формуле:  $c = m/100$ .

Результаты приведены в табл. 5. Найденное содержание мочевины в обоих случаях меньше введенного,

что может свидетельствовать о частичном гидролизе аналита; степень гидролиза выше в более разбавленном растворе. Методика позволяет надежно анализировать образцы с содержанием мочевины 2 мг/л.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 39-0147428-235-89. Методическое руководство по технологии проведения индикаторных исследований и интерпретации результатов для регулирования и контроля процесса заводнения нефтяных залежей. Грозный, 1989.
2. ГОСТ 2081-92. Карбамид. Технические условия (<http://www.himtrade.ru/g/2081-92.htm>).
3. Колориметрические (фотометрические) методы определения неметаллов. М., 1963. С. 80.
4. Бабко А.К., Пилипенко А.Т. Фотометрический анализ. Методы определения неметаллов. М., 1974. С. 11.
5. ПНД Ф 14.1:2.1-95. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. М., 1995.
6. <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D1%87%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%BA>
7. Интернет портал химиков-аналитиков ANCHEM.RU >>Форумы>>1. Аналитический форум (ответ пользователя 18.02.2005).
8. ГОСТ 30181.5-94. Удобрения минеральные. Метод определения массовой доли амидного азота в сложных удобрениях (спектрофотометрический метод). 1996.
9. Булатов М.И., Калинин И.П. Практическое руководство по фотометрическим методам. Л., 1986. С. 245.
10. Органическая химия. Кн. 1 / Под ред. Н.А. Тюкавкиной. М., 2008. С. 498.
11. Беккер Г. Введение в электронную теорию органических реакций. М., 1977. С. 296.
12. Основы аналитической химии. Кн. 2. / Под ред. Ю.А. Золотова. М., 2002. С. 273.
13. РД 52.24.497-2005. Методические указания. Методика выполнения измерений цветности поверхностных вод суши фотометрическим методом. Ростов-на-Дону, 1995.

Поступила в редакцию 01.02.2011

## PHOTOMETRIC DEFINITION OF UREA IN NATURAL WATERS

**E.M. Basova, M.A. Bulanova, V.M. Ivanov**

*(Division of Analytical Chemistry)*

**The photometric method determination of urea with use as reagent *p*-dimethylaminobenzaldehyde is developed. The method reliably to determine 10 mg/L of urea from aliquot part 10 mL. The technique is applied for urea determination in river water.**

**Key words:** *urea, p-dimethylaminobenzaldehyde, natural water, photometric determination.*

**Сведения об авторах:** *Басова Елена Михайловна* – профессор Международного университета природы, общества и человека «Дубна», докт. хим. наук; *Буланова Мария Андреевна* – студент Международного университета природы, общества и человека «Дубна»; *Иванов Вадим Михайлович* – профессор кафедры аналитической химии химического факультета МГУ, докт. хим. наук ([mvonavi@mail.ru](mailto:mvonavi@mail.ru)).