

щим ниже уровня скорости звука Ландау. В теоретической модели учитываются теплофизические свойства материала частиц и их размер, а также характерная частота и амплитуда возмущения давления.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 11-08-00368-а, 12-08-00734-а, 12-08-31243 мол\_а).

### Литература

1. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
2. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. 440 с.
3. Семенов Н.И., Костерин Р.И. Результаты исследования скоростей звука в движущихся газожидкостных смесях // Теплоэнергетика. 1964. № 6. с. 46.
4. Grolmes M.A., Fauske H.K. Comparison of propagation characteristics of compression and rarefaction pressure pulses in two-phase, one-component bubble flow // Trans. Amer. Nucl. Soc. 1968. V. 11. № 2. P. 683.
5. Kokernak R., Fedman G. Velocity of sound in two-phase flow of R1 // American Society of Heating Refrigerating And Air-Conditioning Engineers-Journal. 1972. № 2. P. 35.
6. Покусаев Б.Г. Волны давления в пузырьковых газо- и парожидкостных средах / В кн.: Нелинейные волновые процессы в двухфазных средах. Новосибирск. 1979. с. 26.
7. Покусаев Б.Г., Таиров Э.А., Гриценко М.Ю. Распространение возмущений давления в пористой среде при фильтрации двухфазного потока // ТВТ. 2004. Т. 42. № 6. с. 947.
8. Покусаев Б.Г., Таиров Э.А., Васильев С.А. Скорость низкочастотных волн давления в парожидкостной среде с неподвижным слоем шаровых частиц // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 3. с. 341.
9. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика. Т 6. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2001. 736 с.
10. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 2. М.: Наука, 1987. 359 с.
11. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т.1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ. / Под ред. П.Л. Кириллова. М.: ИздАТ, 2010. 776 с.
12. Авдеев А.А., Балунов Б.Ф., Рыбин Р.А. и др. Гидродинамическое сопротивление при течении двухфазной смеси в шаровой засыпке // ТВТ. 2003. Т.41, № 3. с. 432.

### **Перспективы совершенствования фотоколориметрических газоанализаторов**

Свирюкова О.В., д.т.н. проф. Латышенко К.П., д.т.н. проф. Рылов В.А.

*Университет машиностроения*

*Svirukova@yandex.ru*

*Аннотация.* Приведен обзор фотоколориметрического метода анализа воздуха, проведены классификация и анализ фотоколориметрических газоанализаторов по типу чувствительного элемента, описаны их достоинства и недостатки. Рассмотрен принцип работы ленточного фотоколориметрического газоанализатора. Предложены различные возможные технические решения по совершенствованию фотоколориметрических газоанализаторов.

*Ключевые слова:* фотоколориметрические газоанализаторы, микроконцентрации, чувствительный элемент, индикаторная лента, преобразователь ленточный кассетный, чувствительность ленты, экспонирование, фотометрирование.

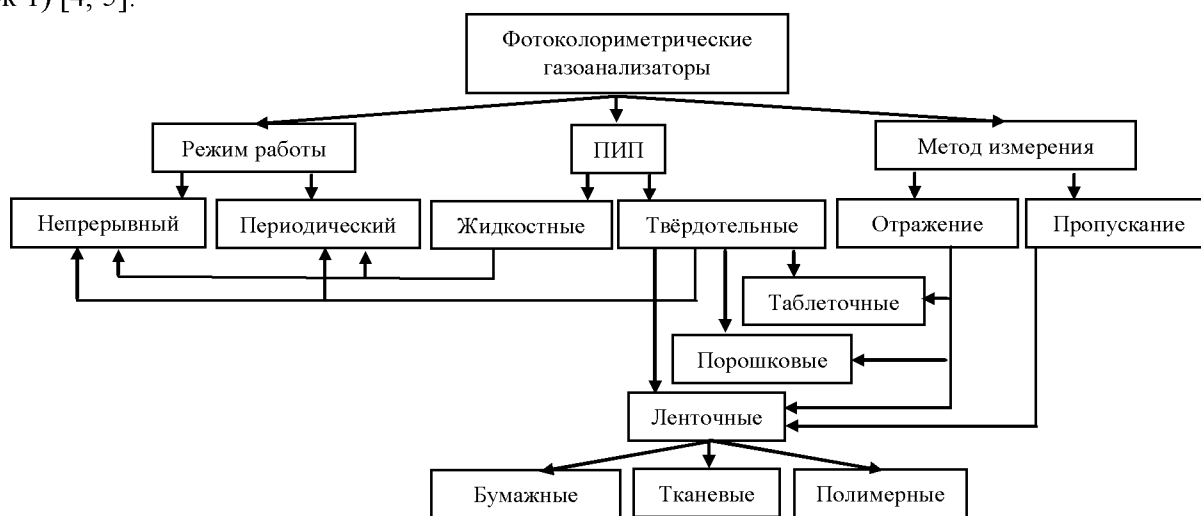
За последние годы существенное развитие в области измерения микроконцентраций веществ в воздухе получили ленточные фотоколориметрические газоанализаторы (ФКГ). В них химическая реакция протекает на текстильной или бумажной ленте, пропитанной соот-

ветствующими реагентами. О концентрации определяемого вещества судят по ослаблению светового потока, отражённого от участка индикаторной ленты, изменившей окраску в ходе анализа, или по изменению её коэффициента пропускания [1].

Так как чувствительность и избирательность газоанализатора определяется свойствами первичного измерительного преобразователя (ПИП), т.е. ленты, то исследование характеристик ленточного чувствительного элемента (ЛЧЭ) такого газоанализатора, оптимальный выбор его параметров с целью повышения чувствительности и уменьшения погрешности измерения является актуальной задачей, представляющей как теоретический, так и практический интерес.

Совершенствование ленточного ФКГ позволяет обеспечить его высокую чувствительность, избирательность, экспрессность, простоту конструкции и обслуживания, универсальность, надёжность и экономичность.

На основе таких критериев, как тип ПИП, метод измерения его окраски, вид измерительной схемы, режим работы газоанализатора и др., проведена классификация ФКГ (рисунок 1) [4, 5].



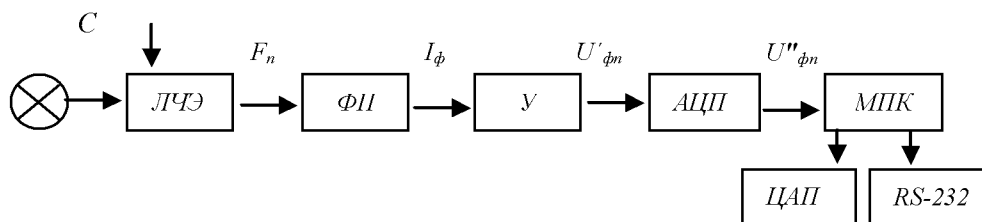
**Рисунок 1 – Классификация фотоколориметрических газоанализаторов**

Работа ФКГ основана на физическом (оптическом) методе проведения анализа со вспомогательными физико-химическими процессами. Результат измерения концентрации вещества в воздухе  $W$  зависит как от параметров ленточного ПИП  $\bar{V}$ , так и параметров самого ФКГ  $\bar{U}$ , т.е.

$$W = f(C_B, C_n, \bar{U}, \bar{V}, \xi), \tag{1}$$

где:  $C_B$  – концентрация определяемого компонента в анализируемой пробе;  $C_n$  – концентрация неопределяемых компонентов;  $\xi$  – шумы.

Структурную схему ФКГ можно представить так (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Структурная схема фотоколориметрического газоанализатора: ФП – фотоприёмник; У – усилитель фототока; МК – микропроцессорный контроллер**

Чувствительность и избирательность такого газоанализатора определяется свойствами первичного преобразователя, т.е. ленты. Цветная химическая реакция, происходящая на лен-

те, должна быть специфической для определяемого компонента, иметь достаточно высокую скорость, сопровождаться изменением окраски в широком спектральном диапазоне.

Разработана и проанализирована математическая модель динамики процесса образования окрашенного комплекса на ленточном ПИП ФКГ, описывающая химические взаимодействия между сорбентом, реагентом и компонентом анализируемой воздушной среды [3].

Решение задачи моделирования фотоколориметрического измерительного преобразователя даёт уравнение переходного процесса (динамическую характеристику) зависимости содержания окрашенного комплекса от времени при взаимодействии с определяемым компонентом

$$y_1 = \varphi(t, C_B, C_A^0, C_Z^0, k_1, k_2, k_3), \quad (2)$$

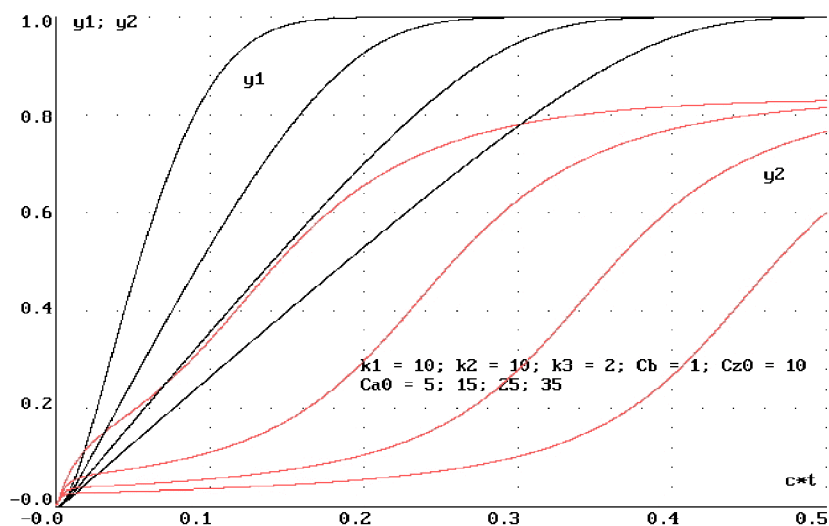
где:  $y_1$  – доля прореагировавшего реагента;  $C_A^0, C_Z^0$  – исходные концентрации реагента и сорбента на ленте.

Алгоритм работы ФКГ предусматривает измерение оптической плотности при различных временах экспозиции в зависимости от содержания определяемого компонента. При малых уровнях концентраций определяемого компонента изменение оптической плотности ленты мало, что позволяет использовать тот же участок ленты для повторных измерений (режим экономии ресурса ленты). Для реализации этого режима имеет значение линейность динамической характеристики в расширенном диапазоне оптической плотности. Динамическая характеристика фотоколориметрического измерительного преобразователя в значительной степени определяется соотношением двух констант:

$$\frac{k_1 C_Z^0}{k_2 C_A^0} = K_p, \quad (3)$$

где:  $K_p$  – рецептурный коэффициент, количественно равный отношению исходных концентраций сорбента и реагента на ленте ПИП.

Изменяя концентрацию реагента  $C_A^0$  при изготовлении состава для покрытия ленты, можно значительно менять величину параметра  $K_p$  (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Кривые установления относительной доли  $y_1$  и  $y_2$  при различных значениях начальной концентрации реактива  $C_A^0$  ( $K_p = 2; 0,67; 0,4; 0,28$ )**

Линейность динамической характеристики ПИП реализуется при малых значениях рецептурного коэффициента в режиме, когда лимитирующей стадией является процесс сорбции определяемого компонента. Критерием оптимальной характеристики является постоянство концентрации сорбента в течение определённого времени. Были исследованы переход-

ные процессы образования окрашенного комплекса в зависимости от соотношения параметров: концентрации определяемого компонента, концентрации сорбента и реагента на ленте. Рассмотрены различные режимы динамических характеристик в зависимости от соотношения постоянных скорости сорбции и химической реакции (режимы быстрой и медленной сорбции). Найдено, что в режиме медленной сорбции динамическая характеристика ПИП обладает более широким диапазоном измерений и имеет меньшую погрешность при измерении дозы определяемого компонента [3].

При увеличении номенклатуры определяемых компонентов и создании новых ПЛК должны учитываться несколько самостоятельных взаимосвязанных задач: выбор материала ленты, определение её диапазона оптической плотности в заданном спектральном интервале, подбор рецептуры ПЛК ( $K_p$ ), разработка методики аттестации ленты и алгоритма работы ФКГ для режима повторных измерений. Создание методики определения рецептурного коэффициента по экспериментальным данным позволяет вести направленный синтез реактива для обеспечения расширенного линейного диапазона динамической характеристики.

Для совершенствования ФКГ предлагается использовать оптические фотометры с перестраиваемыми спектральными каналами. Технически такая реализация осуществима на базе модуля «Омега», разработанного в ОАО «НПО Химавтоматика» с применением волоконной оптики. В этом случае для каждого преобразователя ленточного кассетного (ПЛК) в фотометрическом модуле выбирается спектральный канал, обеспечивающий оптимальный режим повторных измерений определяемого компонента. Впервые предложенное конструкторское решение по компоновке многоканального спектрофотометра в ФКГ позволяет снизить уровень шумов. Для режима многократных измерений с учётом спектрального интервала и параметров функции чувствительности разработана методика аттестации ленты. Разработаны технические решения по модификации структуры ФКГ с целью повышения эффективности процесса измерения микроконцентраций токсичных веществ в воздухе рабочей зоны для одновременного измерения нескольких компонентов путём увеличения ПЛК в одном приборе, посредством отдельного от блока ФП монтажа нескольких ПЛК, а также за счёт создания двух-, трёхполосного ЛЧЭ в одном ПЛК.

По результатам исследований усовершенствован фотоколориметрический ленточный газоанализатор вредных веществ в воздухе и газовых выбросах.

Результаты проведённой работы могут быть использованы предприятиями и организациями, ведущими разработки аналитических приборов для экологического мониторинга воздушных сред, а также для нефтяной, газовой, химической, фармацевтической и других отраслей промышленности.

### Литература

1. Гуревич, М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы) / М.М. Гуревич. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 268 с.
2. Научно-Производственное Объединение «Химавтоматика» [офиц. сайт] <http://www.chimavtomatika.ru>.
3. Свирюкова, О.В. Исследование характеристик фотоколориметрических ленточных измерительных преобразователей / О.В. Свирюкова, В.А. Рылов, М.Ф. Бродский // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24: сб. тр. XXIV межд. н. конф. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2011. – с. 87 – 89.
4. Свирюкова, О.В. Ленточные фотоколориметрические газоанализаторы / О.В. Свирюкова // Мир измерений. – 2012. – № 4. – с. 4 – 10.
5. Свирюкова, О.В. Фотоколориметрический метод анализа воздуха промышленных предприятий / О.В. Свирюкова, В.А. Рылов, К.П. Латышенко // Метрология. – 2012. – № 3. – с. 27 – 35.