

С. В. Черепица,
С.М. Бычков,
А.Н. Коваленко,
А.Л. Мазаник

UNICHROM - ЕДИНЫЙ СТИЛЬ РАБОТЫ С ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Введение

Современный хроматограф - это цифровой прибор, со встроенным «бортовым мини-компьютером». Этот компьютер обеспечивает всю функциональность хроматографа. Общение оператора с прибором осуществляется через встроенную клавиатуру хроматографа на блоке управления. Вся информация отображается на жидкокристаллическом экране блока управления. Оператор устанавливает режимы хроматографа, контролирует состояние установленных параметров на экране, контролирует оцифрованные выходные сигналы на этом же экране. То есть современные хроматографические приборы работают полностью в автономном режиме. Формально оператор может работать с хроматографом и без персонального компьютера. Но где найти того оператора, который согласится так работать?

Не каждый оператор в состоянии запомнить все цифры, которые он видит на экране прибора. С этой целью к хроматографу приставляется компьютер с программным обеспечением (ПО), которое позволяет запомнить всю последовательность цифр и отобразить ее в виде хроматограммы на экране монитора, если это сигнал, и в виде некой структуры, если это состояние режима хроматографа.

Для чего вообще нужна компьютерная хроматографическая программа? Для того, чтобы было приятно, красиво и легко работать в аналитической лаборатории. Чтобы программа выполняла вместо оператора трудоемкие расчеты. Чтобы у программы было как можно больше сервисных служб и возможностей для обработки и отображения большого количества информации. Чтобы программа работала устойчиво, без сбоев и зависаний. Чтобы в программе разобрался профессор Кембриджа и лаборантка из далекого таежного поселка. Чтобы программа была приспособлена к заводским условиям и отдельным лабораториям. Чтобы коллеги-хроматографисты могли свободно обмениваться по электронной почте своими наработками и достижениями, решали научные и практические задачи сообща, используя единую систему хранения, обработки и анализа хроматографических данных. Чтобы имелась возможность обмениваться файлами, в которых одновременно представлены параметры работы хроматографа, оптимизированные для

конкретной МВИ, паспорт каждой хроматограммы, градуировки, результаты валидации, автоматические алгоритмы измерения проб и обработки данных, описание МВИ в формате RTF. Чтобы стоимость программы была сравнимой со стоимостью пакета ОС Windows, и не на порядок больше. Чтобы программа была доступной, имела постоянное сервисное обслуживание и сопровождение в едином формате для всех пользователей, в любой точке Земли. Вот базовые критерии, по которым пользователи выбирают ту или иную хроматографическую программу.

Современные приборы не имеют аналоговых выходов, а компьютеры - не вольтамперметры. Данные в компьютер передаются уже в виде цифры. Оцифровывается выходной сигнал детектора и другие параметры хроматографа внутри хроматографа бортовым компьютером. Таким образом, компьютер и любая компьютерная программа, в том числе UniChrom, не в состоянии повлиять на работоспособность прибора, вся функциональность которого заложена у него внутри.

ПО любого производителя хроматографов обеспечивает в общем случае управление прибором от клавиатуры компьютера, контроль состояния хроматографа и отображение цифровых сигналов по определенному количеству каналов (как правило, не более 4-х) на экране монитора настольного компьютера.

На сегодняшний день производители аналитического оборудования предлагают несколько десятков моделей хроматографов. Изнутри все современные хроматографы представляют собой сложные аналитические приборы с большим количеством датчиков, регуляторов и прочих механизмов. Программное обеспечение, прилагаемое к хроматографу, призвано упростить понимание этого аппарата и максимально облегчить работу с ним как в плане управления и регистрации, так и в плане отображения и обработки измеренных хроматограмм, создания итоговых отчетов. Производители создают свое ПО, скрывающее от пользователя всю сложность хроматографического комплекса. Кроме того, невозможно производить прибор, работающий под управлением компьютерной программы, не имея самой программы. Как отладить? Как выявить ошибки? Поэтому во времена

становления компьютерной хроматографии каждый производитель был вынужден предлагать хроматограф со своим ПО. Эта тенденция пока еще имеет место и в наши дни.

В таблице 1 приведены наиболее широко распространенные в СНГ типы газовых хроматографов и поставляемое к ним ПО.

Данная ситуация создает определенные неудобства пользователям аналитического оборудования. При наличии в лаборатории нескольких типов хроматографов пользователи вынуждены изучать и работать с различными пакетами ПО. Хроматограммы, записанные на различных приборах, трудно сравнивать друг с другом. Отработанный на одном хроматографе шаблон методики выполнения измерений (МВИ) с библиотекой градуировочных кривых, таблицами параметров удерживания компонентов для построения автоматической идентификации и шаблон формирования итогового отчета нельзя перенести на другой хроматограф простым копированием файла. Оператор в итоге вынужден изучить подробно каждую программу. На крупных предприятиях испытательные лаборатории должны представлять свои данные в заводскую сеть. Но даже опытному оператору сводную таблицу результатов придется собирать руками, так как структуры и типы протоколов измерений, а также форматы представления данных для всех хроматографических программ свои.

Работа современной испытательной лаборатории становится невозможной без аккредитации. А это - участие в ежегодных межлабораторных сличительных (МЛС) испытаниях. Если раньше в отчет по МЛС представлялись данные в виде средних значений и величин сходимости, то после принятия ИСО/МЭК 17025 требуется рассчитывать и представлять оценку неопределенности. И вообще, в эру глобального рынка необходимо, чтобы измерения, проводимые в разных странах,

можно было доступно и легко сличить.

Возможность автоматизации этого процесса появилась с повсеместным распространением мини-компьютеров. Принтер под управлением персонального компьютера заменил печатающую машинку. Для автоматизации подготовки и печати документов сразу было предложено несколько текстовых редакторов: "FrameWork", "ChiWriter", "Слово и дело", "Лексикон" и т.д. Но ситуация, когда документ подготовлен в одном редакторе и с ним нельзя продолжить работать простым переносом копии на дискете на другой компьютер с другой программой, стала недопустимой. Для достижения универсальности было предложено решение в виде MS Word.

Анализ ситуации в случае с хроматографами показывает, что объективно имеется спрос на предложение универсального, по крайней мере, охватывающего имеющийся парк наиболее распространенных хроматографов, пакета ПО. Обратим внимание, что кроме многих отмеченных выше плюсов за создание такого ПО, есть один минус.

Партнеры и конкуренты

Непосредственные пользователи хроматографов, руководители исследовательских и испытательных лабораторий, в соответствии с рыночными условиями объективно заинтересованы в снижении издержек своей работы. Таким образом, они объективно и субъективно заинтересованы в наличии на рынке пакета универсального ПО. Можно сказать, что пользователи хроматографов являются партнерами в разработке и продвижении на рынке такой продукции.

Объективно каждый из удержавшихся на рынке производителей хроматографов уже имеет свой пакет ПО, он его включает в комплект поставки хроматографа, зачастую в обязательном порядке. Если срок эксплуатации хроматографа составляет от 10 до 30 лет, то

Таблица 1

ПЕРЕЧЕНЬ НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ В СНГ МОДЕЛЕЙ ХРОМАТОГРАФОВ И СООТВЕТСТВУЮЩЕГО ПО

Модель хроматографа	Название фирмы	Наименование программного обеспечения	Язык ПО и документации
Agilent (HP)	Agilent (Hewlett-Packard)	ChemStation	RUS/ENG
Varian	Varian	Star Workstation	ENG
Perkin-Elmer	Perkin-Elmer	TurboChrom / TotalChrom	ENG
Shimadzu	Shimadzu	Class VP	ENG
Кристапп-2000M \ 5000	ЗАО «Хроматэк»	Хроматэк Аналитик	RUS
Кристалл юкс 4000	ЗАО «Метахром»	NetChrom	RUS
Цвет-800	ОАО «Цвет»	Цвет-Хром	RUS
Миличром-5	ЗАО «Научприбор»	E-Chrom	ENG/RUS
Миличром А-02	ЗАО «ЭкоНова»	M-Chrom	ENG/RUS
CE Trace2000	Scientific Software	EZChrom	ENG

его ПО претерпевает моральное старение уже через 3-4 года. Как следствие, каждый производитель вынужден содержать штат программистов, дизайнеров и методистов для непрерывного развития своего ПО. Они должны все время вносить в ПО все новые требования валидации, фармакопейных статей, поддерживать работу с новыми версиями операционных систем, согласовывать передачу данных в ЛИМС и т.д. Отказ от своего ПО для производителей сопряжен не только с большими финансовыми потерями, но и с потерей своего престижа на рынке, сокращением рабочих мест, появлением зависимости от внешнего поставщика ПО. Производители объективно и субъективно не заинтересованы в появлении на рынке такого универсального пакета. В этом смысле производители хроматографов являются конкурентами предлагаемого решения.

Предмет для обсуждения

Для работы в едином стиле с хроматографическим оборудованием различных фирм, производителей аналитического оборудования, была предложена идея и осуществлен проект по разработке универсальной системы автоматизации хроматографических исследований UniChrom - Universal Chromatography.

Изначально заложенный в основу построения системы UniChrom принцип модульности и универсализации пользовательского интерфейса для различных приборов позволяет:

- работать с приборами, поддерживающими электронное управление и сбор данных в едином стиле для разнородных приборов;

- поддерживать работу с цифровыми приборами как локально, так и по протоколу TCP/ IP через локальную сеть или Internet, причем даже для приборов, не имеющих штатно таких возможностей;

- работать с любым типом хроматографического оборудования, будь-то газовый хроматограф, жидкостной хроматограф или система капиллярного электрофореза, с автоматическим дозатором газовых или жидких проб;

- хранить данные, метод обработки, результаты, калибровки, градуировки, audit trail log, данные GLP в одном файле;

- поддерживать приборы, имеющие автоматические дозаторы,

- автоматизировать работу с любым старым хроматографом, изготовленным более 20 лет тому назад, и одновременно работать в едином стиле с современными хроматографами ведущих мировых фирм, изготовленными уже в 21 веке;

- свободно обмениваться файлами измеренных данных, полученных на различных хроматографах;

- самостоятельно создавать любые сценарии выполнения измерений и экспертной обработки данных;

- автоматически проводить тестирование и поверку хроматографа.

Наиболее наглядно перечисленные выше возможности UniChrom оказываются востребованы при работе ОТК крупного химического предприятия, например, нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) или предприятия типа «Невинномысский Азот».

Как работали раньше? В ЦЗЛ для требуемых видов испытаний по ГОСТ, ТУ или другой нормативной документации выполнялась адаптация методики выполнения измерений (МВИ) к имеющемуся парку аналитического оборудования. Подбирались оптимальные режимы хроматографа, распечатывали хроматограмму с идентифицированными пиками, расписывали последовательность обработки хроматограмм, алгоритм расчета концентраций, оценки неопределенности. Утвержденный многостраничный отчет передавали в цеховые испытательные лаборатории. И здесь снова опытный инженер-химик начинал адаптацию переданной вместе с отчетом МВИ к конкретному имеющемуся хроматографу.

И как работают теперь? В ЦЗЛ копируют всего только один файл с отлаженным шаблоном методики с заданными параметрами температурных режимов и газовых потоков хроматографа, с наработанными библиотеками для автоматической идентификации индивидуальных компонентов, с базами данных физико-химических свойств индивидуальных компонентов, входящих в состав испытуемых веществ, условиями валидации. Затем этот шаблон может быть перенесен из одной лаборатории в другую простым копированием файла. Здесь имеется некий аналог с шаблонами в формате Word или Excel. Начать работать с ними можно на любом компьютере, независимо от фирмы-производителя. Ведь операционная система на персональных компьютерах во всех странах уже одна и та же - Windows. Более того, шаблонами методик можно моментально обмениваться через Internet с коллегами на разных предприятиях, даже если они находятся на другом континенте.

Приведенное на рис. 1 изображение настроек хроматографа Кристалл-2000М/5000 будет выглядеть так же, как и в случае работы на приборе HP 5890/6890 или, например, Shimadzu GC17. На сегодняшний день пакет UniChrom поддерживает полный контроль и управление следующими газовыми хроматографами:

Agilent HP 6890N, 6890 Plus, HP-5890 Series II, HP-5890A, HP-4890D, Shimadzu GC-17A, Кристалл-5000, Кристалл-2000 М, Кристаллюкс-4000, Цвет-800 и жидкостными хроматографами: Милихром, Стайер, Флюорат-02-2М /1/. Любые ГХ/ЖХ системы поддерживаются с помощью АЦП: LabNET, E-24, Aquilon, LZI. Все новые драйверы поддержки различных марок аналитического оборудования после тестирования размещаются на сайте www.unichrom.com.

Принципиальное отличие ПО UniChrom от других пакетов

Сравнение пакетов разных ПО для хроматографии при наличии небольших внешних различий с первого взгляда показывает общую их схожесть. Где-то используется меню, где-то - панель инструментов, где-то - стартовый экран направляет пользователя по проторенным тропкам хроматографического анализа. Все это внешние детали, но они не скрывают главного. Есть некая логическая структура, через которую проходят измерительные данные на пути к последней визуальной форме - отчету о выполненном анализе. Ниже в таблице 2 приведена эта структура, а заодно и последовательность действий любой компьютерной хроматографической системы.

В описанную выше структуру попадают практически все системы обработки данных, существующие на рынке. Структура эта всем хорошо знакома и впервые была представлена компанией Hewlett Packard, в настоящее время Agilent, в продукте HP ChemStation.

Эта схема настолько проста и очевидна, что реализована практически всеми производителями хроматографического ПО.

Если взглянуть на эту схему, то видно, что двигаться по ней можно только в одну сторону, от пункта 1 к пункту 7, и никак иначе. Может возникнуть вопрос: а зачем двигаться от пункта 5 к пункту 4, например? А затем, например, что исследователя не устроили результаты пункта 6, потому что неправильно произведен пункт 5. Есть только два варианта, чтобы пункты 1-7 сработали безупречно:

1. Сделать такой аппарат, чтобы анализы на нем воспроизводились идеально.
2. Подбирать такие пробы, чтобы они незначительно отличались друг от друга.

Если вариант 1 возможен и теоретически и практически, то вариант 2 — это нонсенс, как для исследователя, так и для сотрудника лаборатории качества, Потому что исследователю необходимо видеть и норму, и отклонения от нормы.

Приведем простой наглядный пример. При наборе текста в Word сделали опечатку. Необходимо просто возвратиться немного назад и исправить ее, а не набирать текст заново, как на пишущей машинке. В конце концов, на машинке можно было напечатать букву поверху, потому что там все-таки была клавиша возврата на 1 символ. Нам могут возразить. А как же GLP? Нельзя менять то, что сделала машина. На это можно ответить: а машина всегда права? Кстати, та же GLP на это ответит — "сырые" измерительные данные

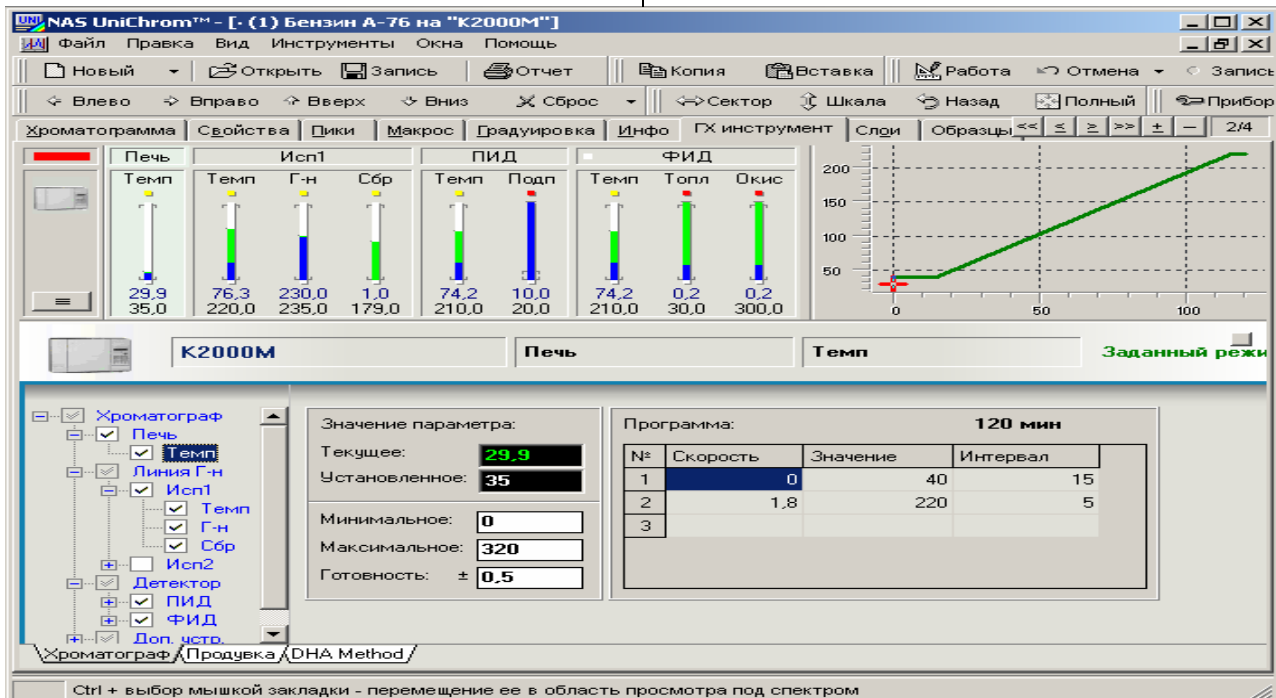


Рис. 1. Единый стиль работы UniChrom с любыми хроматографами позволяет построить последовательность вывода прибора на требуемый режим, выполнять измерения, обрабатывать данные и генерировать итоговый отчет в автоматическом режиме.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ ПО ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Этап	Назначение
1. Загрузка методики в измерительный прибор	Установка режимов прибора для проведения анализа Режимы содержатся в файле метода
2. Измерение аналитического сигнала	Получение сигнала с детекторов и отображение его визуально для наблюдения. Получается файл данных или сигнал соответствующего детектора.
3. Обработка аналитического сигнала	Обработка сигнала, например, фильтрация с целью обеспечения наилучших шумовых характеристик и устранение случайных выбросов, возникающих во время измерения. Получается фильтрованный сигнал .
4. Интегрирование сигнала	Поиск пиков и вычисление их аналитических параметров. Получается таблица пиков , найденных по условиям, описанным в Файле метода .
5. Идентификация пиков	Сопоставление таблицы пиков, полученной после интегрирования и библиотечной, калибровочной таблицы, содержащейся в файле калибровки . Получается таблица идентифицированных пиков .
6. Расчет результатов	Расчет результатов по найденным площадям или высотам пиков, которые пропорциональны количеству вещества в пробе. Если количественный расчет выполняется с использованием градуировки, то необходимы градуировочные файлы , содержащие таблицы компонентов градуировки с указанными значениями стандартных концентраций. Такие файлы называются градуировочными уровнями .
7. Выдача итогового отчета	В соответствии с выбранным пользователем форматом отчета создается файл отчета с результатами количественного и/или качественного анализа.

должны храниться вместе с правилами их обработки, чтобы результаты могли быть всегда воспроизведены. Если вы изменили правила обработки, то они изменились здесь и сейчас, а не в методе и навсегда. А для того, чтобы это было просто и красиво, как в Word, а не как на пишущей машинке — нужна только одна кнопка - «Назад».

Если продолжать далее аналогию с офисными пакетами, то давайте представим вместо этого множества файлов, пусть даже и лежащих в одной папке, один файл, документ как в Word, рабочую книгу как в Excel, базу данных как в Access.

Есть документ — сложный многоуровневый, со страницами, оглавлением, указателями, закладками. В документе есть объекты: параграфы, картинки, графики, таблицы. Это офисный пакет. Сегодня это всем уже привычно, всем очевидно. Есть объект, вы поменяли его свойства - и результат немедленно увидели на экране. WISIWYG - what is seen is what you get.

А теперь представим:

- вместо текста - сигналы с детекторов,
- вместо параграфов - пики,
- вместо таблиц - таблицы пиков,
- вместо градуировочных файлов - живые градуировочные графики,
- вместо страниц - страницы хроматограммы, пиков, метода, страницы управления прибором.

.... И все это - один файл - ваш документ.

Итоговый отчет установленного образца генерируется шаблоном в MS Excel. Важно отметить, что все измеренные данные и условия испытаний передаются в соответствующие ячейки заготовленного шаблона непосредственно из UniChrom по технологии OLE Automation. Вследствие динамической связи между UniChrom шаблоном в MS Excel все изменения параметров в UniChrom сразу же отражаются в ячейках шаблона.

Именно такой подход формирования итогового отчета реально позволил провести автоматизацию обработки хроматографических данных по нескольким десяткам МВИ в Контрольных лабораториях крупных предприятий нефтехимического комплекса России, Украины и Беларуси. Так как теперь уже практически повсеместно в испытательных лабораториях специалисты ежедневно работают с MS Office, то переделать шаблон, представленный на рис.3, полученный от коллеги из Беларуси, например, в Индии, не представляет никаких трудностей для рядового лаборанта.

Естественно, что на документ может быть несколько точек зрения: он сам, его структура, его оглавления, указатели и т. д.- каждому представлению документа отведено его собственное визуальное представление. Если вы добавили параграф, то почему он не должен появиться в оглавлении? Если вы добавили градуировочный уровень, то почему он не должен сразу же появиться в градуировочном графике? Если вы исправили ошибочно введенную стандартную концентрацию, то почему градуировка не меняется сразу? Это подразумевается, это должно быть. Так работает концепция Document-View, предложенная где-то 15 лет назад известными производителями средств разработки ПО.

Просто представьте - система обработки хроматографической информации, построенная по принципам, применяемым в тысячах программ. Вы работаете с вашими данными как с Corel Draw, MS Office, Adobe Photoshop и т.д.

Есть документ, в нем живут объекты, изменение свойств которых сразу отображается в самом документе. Ничего нового. Система UniChrom построена именно по таким принципам со второй версии, написанной в 1992 году.

Заключение

Рассмотрим, для наглядности, те области применения универсального ПО для работы с аналитическим оборудованием, где экономическая и социальная эффективность его применения наиболее очевидна. Например, испытательные лаборатории по анализу остаточного содержания пестицидов имеются в:

- центрах стандартизации, метрологии и сертификации (Госстандарт),
- центрах гигиены, эпидемиологии и здоровья (Минздрав),
- отделах аналитического контроля (Минприроды),
- ветлабораториях, контрольно-токсикологических лабораториях, лабораториях крупных хлебозаводов, молокозаводов, заводов по

производству комбикормов, плодоовощных комбинатов (Минсельхозпрод),

- лабораториях предприятий по снабжению питьевой водой крупных населенных пунктов (Минжилкомхоз),

- учебных и исследовательских лабораториях вузов, в которых проходят обучение будущие специалисты (Минобразования и Минздрав).

Возможность применения единого ПО при работе с аналитическим оборудованием позволит оперативно разрабатывать и внедрять в повседневную практику новые МВИ практически сразу во все перечисленные выше лаборатории, эффективно проводить МЛС, существенно упростить подготовку методического материала для учебного процесса.

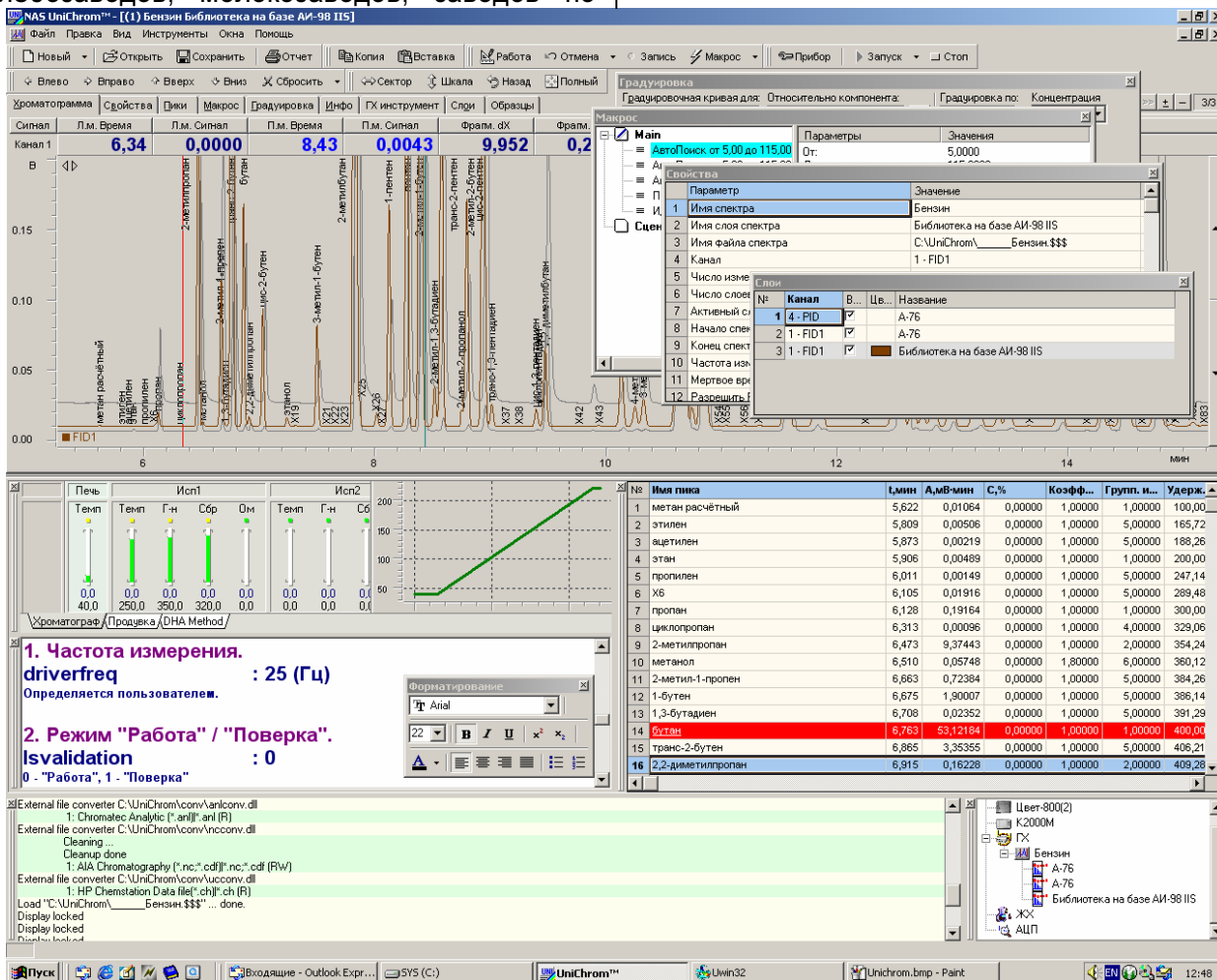


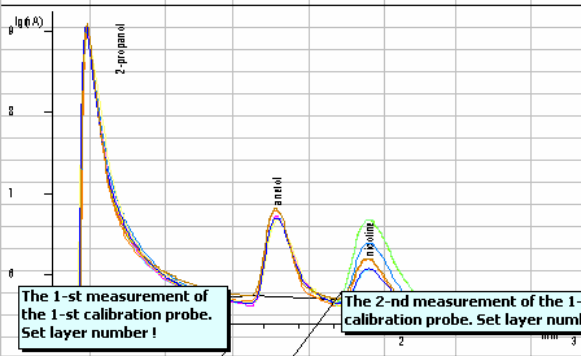
Рис. 2. Файл системы UniChrom - GC/LC Office document-содержит:

- а) измеренные данные, представленные хроматограммами,
- б) паспорт (или свойства) хроматограмм,
- в) автоматические алгоритмы обработки для каждой хроматограммы,
- г) таблицы пиков со всеми необходимыми полями (имя пика, высота, площадь, время удерживания, полуширина, концентрация и т.д.),
- д) методы измерений, представленные набором параметров хроматографа,
- е) градуировки,
- ж) вспомогательная информация в формате RTF,
- з) структура документа в виде таблицы слоев хроматограмм,
- и) журнал отладочной информации,
- к) журнал событий: GLP-лог.



Belarusian State Institute of Metrology
Laboratory for testing of foods and cigarettes

Spectrum name Nicotine - calibration and verification ISO 10315
Layer name repeat 2-nd calibration mix № 4 anetol 1.2288 mg/ml nicotine 0.374 mg/2 ml
File name C:\UniChrom\Nicotine in smoke condensates ISO 10315 Template - eng\Nicotine in smoke condensates ISO 10315 Template - eng \$\$\$



**Determination of nicotine in 2-propanol
Method of Internal Standard (IS)**

$$C_i = \frac{K_i \cdot S_i}{S_{st}} \cdot C_{st}$$

$K_i = k_i / k_{st}$ - relative response of detector
 where $k_i = \frac{C_{i2} - C_{i1}}{S_{i2} - S_{i1}}$
 k_i - is the tangent of calibration curve

- Concentration of added nicotine
- Concentration of added ethanol
- Uncorrected concentration of 2-propanol (like a pure substance)
- Relative response
- Response, tangent of calibration curve
- Corrected concentration of 2-propanol (without nicotine and without anetol)
- Corrected concentration of 2-propanol (without nicotine and without anetol)
- The 1-st measurement Set inspected layer number !
- The 2-st measurement Set inspected layer number !
- Nicotine concentration relative to IS anetol
- Nicotine concentration relative to IS 2-propanol

Calibration:

Component	The 1-st	The 2-nd	Area 1	Area 2	Average	Repeatability	Concentr	K_i	k_i
nicotine	2	3	3,16	3,15	3,15	0,2	0,038	1,154	0,0068
anetol	2	3	206,28	208,16	207,22	0,9	1,229	0,083	0,0059
2-propanol	2	3	19119,85	19568,98	19344,42	2,3	1600,000	1598,7	0,0826
nicotine	10	11	134,14	134,58	134,36	0,3	0,936		
anetol	10	11	208,48	209,32	208,90	0,4	1,229		
2-propanol	10	11	20207,36	19622,42	19914,89	2,9	1600,000	1597,8	

Probe:

Component	The 1-st	The 2-nd	Area 1	Area 2	Average	Repeatability	Concentr	Concentration of nicotine	
								IS anetol	IS 2-propanol
nicotine	8	9	285,64	282,80	284,22	1,0		1,943	1,876
anetol	8	9	209,27	205,68	207,47	1,7	1,229		
2-propanol	8	9	20531,25	19543,35	20037,30	4,9	1600,000	1596,9	

Verification

Component	The 1-st	Area	Concentr	Concentration of nicotine	
				IS anetol	IS 2-propanol
nicotine	11	134,58	0,936	0,912	0,909
anetol	11	209,32	1,229		
2-propanol	11	19622,42	1600,000	1598,8	

Result:

Nicotine concentration, mcg/2mL Certificate	Verification	Discrepancy, %
relative to anetol	0,912	-2,6
relative to 2-propanol	0,909	-2,9

Operator: Filanchuk T.I.

Рис.3. Вычисления всех необходимых коэффициентов, определение сходимости, выполнение валидации и формирование итогового отчета выполняется шаблоном **Nicotine in smoke condensates ISO 10315 Template - eng.xlt** в MS Excel.

Литература

1. Charapitsa S.V., Bychkow S.M., Kavalenka A.N., Mazanik A.L. The Universal Chromatographic Data System - UniChrom. Abstracts of Pittsburgh Conference on Analytical Chemistry and Applied Spectroscopy, March 9-14, Orlando, Florida, № 90-49P, 2003, P.131.

Сергей Вячеславович Черепица, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией аналитических исследований, Институт ядерных проблем БГУ.

Сергей Михайлович Бычков, младший научный сотрудник, Институт ядерных проблем БГУ.

Антон Николаевич Коваленко, научный сотрудник, Институт ядерных проблем БГУ.

Аркадий Леонидович Мазаник, старший научный сотрудник, Институт ядерных проблем БГУ.