

## ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ЛАБОРАТОРИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПАУНДИРОВАНИЕМ ТОПЛИВ НА НПЗ

А.А. Аносов, Г.Л. Ефитов, Р.А. Шайдуллин (АО «Хоневелл»),  
Ю.В. Голованов, А.В. Королев (ОАО «Газромнефть – ОНПЗ»)

*Рассмотрена роль лаборатории как ключевого элемента в решении задачи управления компаундированием топлива, предложено введение небраковочной границы качества для товарного топлива. Проанализированы причины отдачи качества и пути ее снижения в системах off-line и on-line оптимизации. На примере Омского НПЗ проведен анализ работы поточного NIR анализатора, статистическими методами проверена адекватность калибровочной модели, предложена и рассчитана коррекция задания для on-line оптимизации. Рассмотрены возможности повышения эффективности работы лаборатории.*

*Ключевые слова: погрешность, небраковочная граница, отдача качества, лаборатория, поточный анализ, off-line и on-line оптимизация.*

### Управление товарным производством и лаборатория

Основной задачей товарного производства НПЗ является получение продуктов с заданными спецификациями — показателями качества, удовлетворяющими техническим и экологическим требованиям к соответствующей марке продукта и определяемыми государственными стандартами. Компоненты смешения имеют различные значения показателей качества, как выше, так и ниже соответствующих требований ГОСТ для товарных продуктов и соответственно различную стоимость (которая может оцениваться различными методами). Система управления смешением должна определять и поддерживать оптимальную рецептуру приготовления партии бензина таким образом, чтобы с минимальными затратами получать требуемые товарные продукты, удовлетворяющие ГОСТам [1–4].

Определение оптимальной рецептуры относится к задачам off-line оптимизации, то есть не связано с реальным временем. Но ввиду нестабильности качества компонентов, наличия погрешности реализации рецептуры, нелинейности смешения свойств и других факторов только off-line оптимизации оказывается недостаточно, и необходима оптимизация в реальном времени — on-line [5]. Важной частью системы on-line управления является поточный (в реальном времени) анализ свойств товарных продуктов.

Наиболее сложным классом продуктов товарного производства с точки зрения управления являются бензины. При смешении бензинов используется наибольшее число компонентов (в среднем 6...12 ед.), некоторые из которых покупаются у сторонних производителей. Из всех товарных продуктов НПЗ именно для бензинов применение средств математической оптимизации способно обеспечить наибольшую при-

быль. Поэтому далее в статье будут рассматриваться вопросы смешения продуктов на примере бензинов, хотя все приведенные соображения применимы и для других классов продуктов: дизельных топлив, мазутов и т.д.

Основным критерием, определяющим экономическую эффективность смешения бензинов, является так называемая отдача качества, прежде всего, по октановым числам [6–8]. Измеренная отдача качества — превышение (недостижение) измеренных показателей качества товарного бензина минимальных (максимальных) нормативных ограничений, требуемых спецификациями. Даже при оптимизационном расчете рецептуры избежать отдачи качества по всем показателям невозможно. При оптимальном смешении можно попытаться свести к нулю в общем случае только отдачу качества для одного показателя. При этом другие показатели могут превышать заданную спецификацию (уточним, что здесь речь идет о расчетных значениях показателей качества, которые должны являться заданием для системы управления, а не о фактических значениях показателей, которые будут зависеть от точности измерений и эффективности системы управления). В некоторых случаях может получиться сведение к нулю отдачи качества сразу для нескольких показателей. Таким образом, чем больше значений нормируемых показателей в оптимальной рецептуре будет находиться на границе ограничений, тем лучше рецепт смешения, но это определяется как эффективностью оптимизации, так и исходными свойствами компонентов смешения. Например, если для смешения бензина Нормаль-80 доступны только компоненты, обладающие значениями октановых чисел (по исследовательскому методу) не ниже 90,

то при любой оптимизации неизбежен большой запас качества (не меньше 10).

Товарные бензины в обязательном порядке папортизируются в лаборатории, поэтому одним из ключевых факторов, определяющих наличие отдачи качества, является неустранимость погрешности измерения любого свойства бензина в лаборатории. На каждое из таких лабораторных измерений имеется соответствующий ГОСТ, где указывается точность (воспроизводимость и сходимость) метода измерения. То есть неизбежная погрешность измерения свойства в лаборатории приводит к необходимости введения запаса по качеству для этого свойства. Причем, чем больше погрешность измерения, тем больше должен быть запас качества, если НПЗ заинтересован в отсутствии рекламаций со стороны потребителей (которые тоже измеряют свойства в своей лаборатории с погрешностью и определяют, соответствует ли покупаемый бензин ГОСТу).

Риски, связанные с погрешностью измерения, часто «переносятся» на потребителя, и этот подход может быть вполне оправдан с точки зрения завода, если он устраивает потребителей. Однако, если рекламации по качеству могут приводить к значительным штрафным санкциям и/или репутационным потерям, то для таких потребителей нужно закладывать превышение качественных показателей над требованиями спецификаций, то есть лаборатория должна признать бензин качественным, только если его ИОЧ будет не ниже, например, 95,4 (приведенное значение указано для иллюстрации). Эту отдачу, точнее «запас» качества в 0,4 пункта будем называть «небраковочной границей». Такой «запас» позволяет снизить вероятность возникновения претензий со стороны потребителей, которые тоже должны учитывать наличие погрешности измерения при определении соответствия свойств бензина ГОСТу. При применении небраковочной границы отдачу качества следует вычислять от нее, а не от требований спецификаций ГОСТа. То есть, несмотря на то, что при получении продукта с ИОЧ 95,6 (на рис. 1 результат лабораторного анализа изображен верхней горизонтальной линией) превышает требования спецификаций на  $\Delta = 0,6$ , при использовании небраковочной границы  $\Delta_{\text{safe}} = 0,4$ , фактическая отдача качества  $\Delta_g$  составит 0,2 пункта.

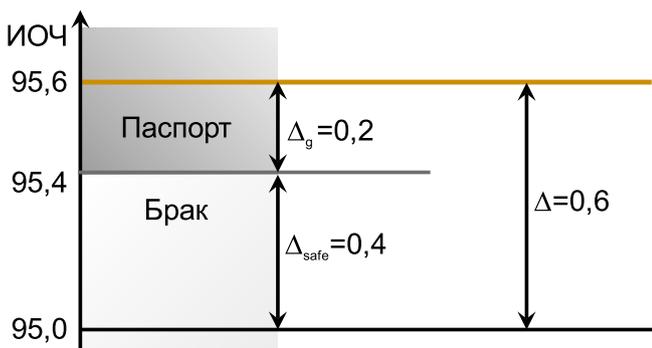


Рис. 1. Небраковочная граница при смешении товарных продуктов

Иными словами, небраковочную границу  $\Delta_{\text{safe}}$  можно трактовать как плату НПЗ за погрешность измерения свойств товарных бензинов в лабораториях производителя и потребителя и не рассматривать ее как отдачу качества. Это неизбежное отклонение от спецификаций ГОСТа в сторону усиления требований, если НПЗ хочет гарантировать, что истинные значения качественных показателей бензина удовлетворяют требованиям спецификаций, и экспертизы качества (в лаборатории заказчика или независимые) не дадут оснований для предъявления рекламаций.

Рекламации по качеству могут возникать не только по октановым числам, но также и по экологическим показателям, таким как содержание серы, бензола, ароматики, а также по любым другим показателям качества, которые нормируются для данного продукта. Нарушение экологических спецификаций у заказчика может приводить к требованию на снижение класса продукта (для бензинов пятого класса), что уже связано со стоимостью продукта, а также к серьезным штрафным санкциям со стороны государственных контрольно-надзорных органов за нарушение требований технического регламента таможенного союза.

На некоторых НПЗ небраковочная граница применяется лабораторией явно, требуя у производителей выполнения заданного запаса качества и фиксируя в паспорте на продукт фактически полученные результаты испытаний. Также существуют предприятия, на которых лаборатория занижает паспортные значения, то есть вычитает значение небраковочной границы из полученного результата измерения перед записью в паспорт (например, в стандарте EN 228 явно указано, что в соответствии с европейской директивой 98/70/ЕС рекомендуется вычитать 0,2 из результатов измерений ИОЧ и МОЧ, полученных измерением по ISO 5164 и 5163 соответственно). Тем не менее, на многих НПЗ небраковочную границу не учитывают, осуществляя паспортзацию продукта по фактически полученным результатам измерения с нулевым запасом. Причина в том, что экономические соображения преобладают над репутационными рисками и рисками возникновения штрафных санкций за нарушение спецификаций качества у заказчиков и у государства, поэтому и возникает стремление к нулевому значению небраковочной границы запаса качества. В будущем эта ситуация может измениться, и необходимо будет определить требуемое значение этой границы. В качестве одного из возможных подходов можно рассматривать рекомендации ГОСТ Р 8.580-2001 «Определение и применение показателей прецизионности методов испытаний нефтепродуктов».

В конечном итоге независимо от того, учитывается на НПЗ небраковочная граница или нет, товарное производство должно обеспечить приготовление бензина, который сможет пройти паспортзацию в лаборатории и при этом все же будет иметь минимально возможный запас качества. Проблема состоит в том, что между расчетным значением свойства смешива-

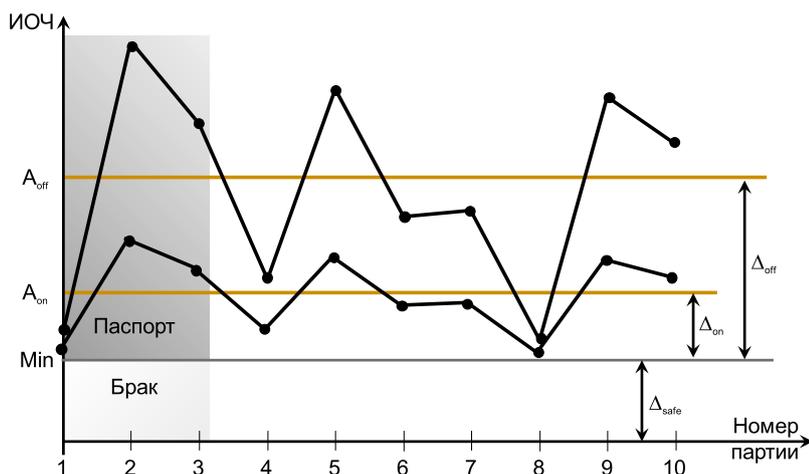


Рис. 2. Запас по качеству при смешении товарных продуктов

емого продукта и результатом лабораторного измерения всегда наблюдается существенное различие.

### Анализ причин отдачи качества

При оптимизационном off-line расчете рецепта смешения товарных бензинов наибольший эффект достигается за счет оптимизации использования компонентов. Снижение же отдачи качества возможно лишь до некоторого предела, после которого возрастает риск получения брака, поскольку между расчетными значениями и результатами измерения свойств лабораторией всегда будет наблюдаться некая разница. Эта разница обусловлена погрешностью измерения лабораторией, неточностью самой модели (из-за нелинейности смешения свойств), возможными ошибками в исходных данных, а также не всегда точной реализацией рецептуры на смесительном оборудовании. Наличие всех этих факторов приводит к тому, что результаты лабораторных анализов нескольких партий бензина (при определении рецептов смешения, которых прогнозировалось одно и то же расчетное значение свойства) будут иметь «разброс» от этого целевого значения. На рис. 2 верхний график иллюстрирует результаты лабораторных измерений ИОЧ бензина за 10 партий при использовании только off-line расче-

Таблица 1. Сводная информация по погрешностям на уровнях off- и on-line оптимизации

		off-line	on-line
	$E_L$		
	$E_Q$		
	$E_C$		
	$E_A$		
	$E_N$		

та.  $A_{off}$  — среднее значение ИОЧ по рассматриваемым партиям, а  $A_{on}$  — средний запас по качеству. Уровень  $Min$  представляет собой минимально допустимое значение свойства, ниже которого продукт будет признан лабораторией как несоответствующий требованиям (забракован). Значение  $Min$  определяется требованиями спецификаций плюс  $\Delta_{safe}$  (небраковочная граница, значение которой зависит от погрешности метода измерений лабораторией). Для предотвращения получения брака по результатам лабораторных анализов в ограничения свойств при выполнении расчета рецепта смешения необходимо закладывать дополнительный «запас качества» ( $\geq A_{off}$ ).

Применение корректировки модели смешения по показаниям поточных анализаторов в on-line системах позволяет значительно снизить влияние проблем точности модели, исходных данных и реализации рецепта, поскольку все эти погрешности нивелируются за счет обратной связи от анализаторов. В on-line системах, таким образом, минимальное значение отдачи качества определяется лишь точностью поточного анализатора на выходе из смесителя и погрешностью лабораторного метода, по которому осуществляется приемка продукта.

На рис. 2 нижний график иллюстрирует результаты лабораторных измерений ИОЧ бензина при использовании систем on-line оптимизации смешения.  $A_{on}$  — среднее значение ИОЧ за 10 партий, а  $A_{on}$  — средний запас по качеству. Поскольку результаты измерения анализатора и лаборатории имеют случайную ошибку, то для исключения брака по результатам лабораторных анализов в модель on-line также необходимо закладывать дополнительный запас по качеству (равный  $A_{on}$ ). Но это значение оказывается на практике существенно ниже, чем  $A_{off}$ .

Снижение запаса по качеству при использовании on-line систем можно пояснить на примере ракетных стрельб. Если производится серия пусков неуправляемых ракет, то они имеют некоторую кучность попадания в цель. Средняя оценка кучности, то есть среднее отклонение от цели —  $\Delta_{off}$ . Если же ракета управляемая, то после пуска производится корректировка ее траектории, точность попадания в цель повышается, и тогда среднее отклонение от цели ( $\Delta_{on}$ ) будет заметно меньше.

Ошибка прогнозирования свойств продукта при расчете рецепта обусловлена целым рядом факторов. В табл. 1 приводится сводная информация по влиянию этих факторов

на уровне off/on-line оптимизации смещения. Рассмотрим каждую из строк таблицы подробнее.

Погрешность или прецизионность определения свойств бензинов в лаборатории ( $E_L$ ) в основном определяется характеристиками применяемого стандартного метода измерения и в рамках одной лаборатории имеет случайный характер.

Ошибка значений свойств компонентов ( $E_Q$ ) вызвана как погрешностью измерения значений этих свойств лабораторными методами (как правило, величина этой погрешности такая же, как и для товарных бензинов), так и нерегулярностью проведения анализов (ходовой контроль качественных показателей компонентов может проводиться раз в несколько дней или только по требованию). При расчете рецепта используются результаты последнего лабораторного анализа компонента, но с момента отбора проб его качество могло существенно измениться.

Погрешность реализации рецептуры ( $E_C$ ) обусловлена точностью измерения компонентов с помощью расходомеров, из-за которой фактический рецепт смещения может отличаться от задания, переданного в систему управления.

Погрешность поточного анализатора ( $E_A$ ) определяется его типом. Для приборов, осуществляющих измерение свойств нефтепродукта стандартными методами, она обусловлена характеристикой применяемого метода и параметрами прибора. Для анализаторов, построенных на косвенном определении качественных показателей, например, инфракрасных спектрометров, погрешность определяется как параметрами самого прибора, так и созданной калибровочной моделью. Калибровочная модель, в свою очередь, строится по результатам измерения свойств в лаборатории, а значит, ее точность зависит от точности лабораторного метода, по которому осуществляется калибровка.

Четыре перечисленных вида погрешностей ( $E_L$ ,  $E_Q$ ,  $E_C$ ,  $E_A$ ) имеют случайную природу, причем случайность определяется большим числом неконтролируемых факторов, влияние каждого из которых относительно невелико, а значит, они должны подчиняться нормальному закону распределения случайной величины. В отличие от них погрешность, связанная с нелинейностями смещения свойств продукта ( $E_N$ ), не является случайной, а зависит от рецептуры и адекватности модели нелинейного смещения. Влияние нелинейности может приводить как к повышению, так и снижению значений свойств смеси по сравнению со значениями, вычисленными по линейным законам. Причем для одного и того же продукта значение ошибки прогнозирования его свойств будет отличаться при различных рецептах смещения.

Согласно правилам математической статистики, а также рекомендациям ГОСТ Р ИСО 5725 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений», для определения погрешности результата вычислений, случайные погрешности исход-

ных данных необходимо складывать геометрически (как квадратный корень из суммы квадратов погрешностей), а систематические — арифметически.

Тогда погрешность  $\Delta_{\text{off}}$  расчета свойств бензина (для off-line систем расчета рецепта без уровня on-line) относительно результата лабораторного измерения составит:

$$\Delta_{\text{off}} = E_N + \sqrt{E_L^2 + E_Q^2 + E_C^2}. \quad (1)$$

Для гарантированного получения качественного бензина при расчете рецепта необходимо закладывать запас качества (например, 95,3 вместо 95,0 по октановому числу). Чем выше влияние факторов, указанных в табл. 1, тем больше должен быть этот запас. Большой запас, в свою очередь, приводит к росту экономических потерь предприятия.

Погрешность  $E_N$ , возникающая при расчете рецептуры из-за неточности моделирования нелинейного смещения основных свойств бензина, может быть снижена путем использования более адекватных нелинейных моделей. Возможности здесь в основном сводятся к параметрической идентификации известных моделей, то есть к определению таких параметров по заданной выборке фактических смещений, которые минимизируют невязку между расчетом и фактом.

Погрешность или прецизионность определения свойств бензинов в лаборатории ( $E_L$ ) в основном определяется характеристиками применяемого стандартного метода измерения лаборатории, некоторые возможности ее снижения рассматриваются ниже (использование более точного измерительного оборудования, параллельные измерения).

Погрешность  $E_Q$  вызвана как погрешностью измерения свойств компонентов в лаборатории, так и низкой частотой проведения лабораторных анализов (например, значения некоторых свойств компонентов могут измеряться один раз в несколько дней или только по требованию). Поэтому одним из способов такого снижения  $E_Q$  является проведение лабораторных анализов всех компонентов непосредственно перед смешением каждой партии бензина (имеет смысл ограничиться проверкой свойств только наиболее критичных показателей качества).

Погрешность реализации рецептуры  $E_C$  определяется, как правило, двумя факторами: точностью измерения расходов компонентов и динамическими свойствами регулирующих клапанов. В то же время современные средства автоматизации с применением массовых расходомеров и алгоритмов управления с компенсацией динамики регулирующих клапанов позволяют свести  $E_C$  практически к нулевому значению.

В случае on-line управления для качественных показателей, не измеряемых в потоке,  $\Delta_{\text{on}}$  будет также определяться формулой (1), то есть  $\Delta_{\text{on}} = \Delta_{\text{off}}$  с той лишь поправкой, что ошибка качества компонентов  $E_Q$  может оказаться более низкой в связи с тем, что к моменту начала смешения (или уже в процессе смешения) могут появляться новые данные о качестве

компонентов, которые были недоступны в момент выполнения off-line расчета).

Для свойств, измеряемых поточными анализаторами, при наличии систем on-line оптимизации необходимо применять следующую формулу определения погрешности  $\Delta_{on}$ :

$$\Delta_{on} = \sqrt{E_L^2 + E_A^2}. \quad (2)$$

Отсутствие членов  $E_N$ ,  $E_Q$  и  $E_C$  в этой формуле связано с тем, что эти погрешности нивелируются механизмом компенсации модели (обратной связи от анализатора), заложенным в системы on-line оптимизации.

#### Поточный анализ

В поточных анализаторах, используемых на станциях смешения бензинов, как правило, применяется технология инфракрасной спектроскопии. Приборы различных производителей имеют свои особенности, влияющие на точность и надежность прибора (обзор существующих технологий можно найти в [6]), но в любом из них принцип действия основан на снятии спектра поглощения измеряемым образцом светового излучения на определенном диапазоне частот в инфракрасном диапазоне. Полученному спектру сопоставляют набор значений качественных показателей этого образца, измеренных стандартными методами в лаборатории.

Процесс сопоставления спектра поглощения образца набору значений качественных показателей называют калибровкой анализатора, а база данных таких пар спектр/значение свойств — калибровочной моделью. Начальная калибровочная модель строится относительно быстро (в зависимости от используемо-

Табл. 2. Результаты проверки корреляции NIR анализатора

		N	m	S <sub>m</sub>	t = m/S <sub>m</sub>	t
		28	0,991	0,013	78,0	2,048
			0,955	0,018	52,0	
-80		68	1,063	0,060	17,8	1,995
			1,050	0,031	33,5	
-92		223	1,167	0,047	25,0	1,97
			0,669	0,051	13,0	
-95		165	0,784	0,047	16,6	1,975
			0,892	0,029	31,2	
-98		57	0,911	0,006	142,8	2
			0,9010	0,011	82,6	

Табл. 3. Результаты проверки статистической значимости показаний NIR анализатора

		N	d	T	t	
		28	0,31	0,153	10,9	2,048
			0,15	0,222	3,7	
-80		68	-0,35	0,362	8,1	1,995
			-0,11	0,314	2,8	
-92		223	-0,01	0,249	0,8	1,97
			-0,15	0,141	15,6	
-95		165	-0,07	0,192	4,8	1,975
			-0,16	0,138	14,7	
-98		57	0,08	0,287	2,1	2
			-0,09	0,276	2,4	

*Жал, в недрах щедрой земли, ждали  
своего часа миллионы и миллионы  
пудов черного, пахучего дурмана, без  
которого планета не может жить, как  
наркоман без опиума.*  
Борис Акунин

го прибора: NIR или FTNIR/FTIR может оказаться достаточно накопления 100 образцов для получения адекватных результатов измерений).

Поскольку в основе калибровочной модели анализатора лежат результаты измерения качественных показателей, полученных стандартными методами в лаборатории, то точность анализатора непосредственно зависит от погрешности лаборатории. Влияние этих погрешностей можно существенно снизить, вводя в модель результаты не единичного измерения, а усреднив результаты нескольких параллельных измерений одного и того же образца.

Недостатками технологии ИК-анализаторов является значительная зависимость точности калибровочной модели от углеводородного состава измеряемого образца. Откалибровав модель для бензинов, смешиваемых из одного набора компонентов, можно получить высокую точность измерения, но даже при незначительном изменении рецептуры параметры точности могут значительно ухудшиться. Поэтому калибровочная модель должна охватывать максимально большой набор возможных композиций смешения. Однократное создание модели без последующих корректировок не даст требуемого результата, поскольку свойства смешиваемых компонентов непрерывно меняются (из-за нестабильности качества нефти, поступающей на завод, изменений параметров каталитических процессов и т. д.).

Наиболее обоснованным способом проверки адекватности калибровочной модели является метод, рекомендованный стандартом ASTM D 6122 (процедура также детально описана [6]). Этот метод предполагает анализ пар данных анализатор-лаборатория для одного и того же измеряемого свойства, состоящий из двух этапов: на первом — выполняется проверка корреляции показаний этих двух наборов данных, на втором — проверка значимости отклонений результатов анализатора и лаборатории.

В 2015 г. компанией Хоневелл была выполнена работа по проверке калибровочной модели ИК-анализатора Pioneer, установленного в лаборатории Омского НПЗ по двум качественным показателям — ИОЧ и МОЧ для четырех товарных бензинов и одного компонента. Аналогичный по конструкции прибор установлен и на станции смешения бензинов, а значит, при условии одинаковых калибровочных моделей оба прибора (поточный и лабораторный) должны иметь одинаковые показатели точности измерения.

Результаты проверки корреляции данных лаборатории и анализатора приведены в табл. 2 ( $N$  — чис-

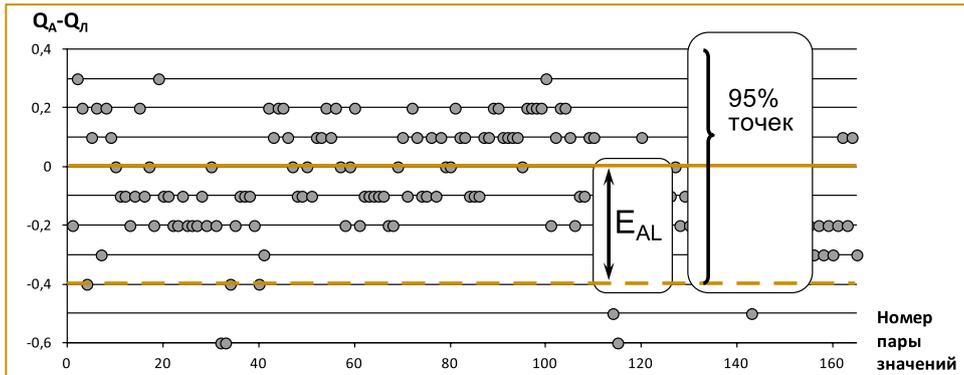


Рис. 3. Запас по качеству при смешении товарных продуктов

ло имеющихся пар, данных анализатор-лаборатория,  $m$ ,  $S_m$ ,  $t$  рассчитаны по формулам из методики ASTM D 6122,  $t_{\text{критическое}}$  — табличное значение критерия Стьюдента).

Как следует из проведенных результатов вычислений, все группы данных показывают очень хорошую корреляцию ( $t > t_{\text{критическое}}$ ). Это означает, что отсутствуют основания не доверять статистической значимости калибровочных моделей для октановых чисел всех рассмотренных бензинов и можно переходить ко второму этапу проверки.

Результаты проверки статистической значимости отклонений показаний анализатора от данных лаборатории приведены в табл. 3.

Как следует из таблицы, только для калибровочной модели Регуляр-92 ИОЧ отличия анализатора от лаборатории статистически незначимы, для бензина Супер-98 значения близки к значениям критерия и можно с натяжкой сказать, что они «хорошие» ( $t < t_{\text{критическое}}$ ). Для остальных представленных данных анализ показал, что отличия анализатора от лаборатории статистически значимы. Столбец d табл. 3 представляет собой среднее отличие показаний анализатора от лаборатории.

В товарном производстве при управлении смешением по показаниям анализатора специалисты (технологи, диспетчеры, операторы) вносят корректирующий запас относительно показаний анализатора, основываясь на опыте предыдущих приготовлений. То есть стара-

ются вести процесс таким образом, чтобы анализатор показывал 95,5 или, наоборот, 94,8 в зависимости от того, в какую сторону смещены показания анализатора и насколько его показания соответствуют лабораторным измерениям (по собственному мнению конкретного специалиста, отвечающего за качество продукта). При таком подходе корректировки показаний анализатора принима-

ются «на глазок» (как правило, очень субъективно) и соответственно не могут обеспечить получение значительного экономического эффекта.

Формулу (2) на практике имеет смысл трактовать следующим образом:  $\Delta_{\text{он}} = E_{\text{AL}}$ , где  $E_{\text{AL}}$  — некоторая неслучайная разница между результатами измерения лаборатории и показаниями анализатора. Далее рассматривается оценка этой разницы.

Необходимо отметить, что приведенные выше рассуждения исходят из необходимости гарантированного получения качественного бензина с первого предъявления лаборатории. При этом, если допустить возможность получения брака для части партий, то можно снизить значение запаса. Причем экономический эффект может оказаться более существенным, чем потери от повторных смешений. Так, в [7] показано, что допустив получение брака в 5% случаев, можно снизить запас по качеству в 1,7 раза, а в 10% случаев — в 2,2 раза. Тем не менее, применение такого подхода должно быть аккуратно просчитано и согласовано с руководством предприятия, поскольку вырастает риск задержек отгрузки и потенциального применения штрафных санкций за простой транспорта.

На самом деле, поскольку оба измерения (лабораторией и анализатором) имеют случайные ошибки,  $E_{\text{AL}}$  можно воспринимать как статистическую оценку разницы результатов анализатора и лаборатории. Для получения такой оценки необходимо взять набор парных значений качественных показате-

лей образцов, полученных анализатором и стандартными методами в лаборатории. Отметим, что это имеет смысл только в случае значимости отклонений анализатора от лаборатории (проверка значимости отклонений по критерию Стьюдента приведена выше). Затем необходимо вычислить разницу значений в каждой паре и найти минимальную границу, в которую «уложатся» 95% значений.

Таблица 4. Оценка значений  $E_{\text{AL}}$

	95%		97,5%		99%		100%	
	$E_{\text{AL}}$	d- $E_{\text{AL}}$						
-80	-0,3	-0,05	-0,45	0,1	-0,5	0,15	-0,5	0,15
	-0,45	0,34	-0,45	0,34	-0,5	0,39	-0,5	0,39
-92	-0,4	0,39	-0,5	0,49	-0,6	0,59	-0,7	0,69
	-0,1	-0,05	-0,2	0,05	-0,25	0,1	-0,3	0,15
-95	-0,2	0,13	-0,28	0,21	-0,35	0,28	-0,4	0,33
	-0,1	-0,06	-0,2	0,04	-0,33	0,17	-0,4	0,24
-98	-0,5	0,58	-0,5	0,58	-0,6	0,68	-0,6	0,68
	-0,4	0,31	-0,45	0,36	-0,5	0,41	-0,5	0,41

На рис. 3 проиллюстрированы полученные результаты на примере набора данных по разнице показаний анализатора и лаборатории для октанового числа по исследовательскому методу (ось ординат). Точками обозначены значения разницы, сплошной коричневой линией — нулевой уровень. Как видно на рисунке, разница показаний анализатора и измерений лаборатории может оказаться как положительной, так и отрицательной, однако нас в первую очередь будут интересовать отрицательные значения, поскольку октановое число специфицируется по нижней границе. То есть, если анализатор выдает заниженные значения относительно лаборатории, необходимо это учитывать и выполнять смещение так, чтобы показания поточного анализатора оказывались выше значений, требуемых спецификацией.

Нижняя прерывистая линия разделяет набор точек на две группы: над ней оказывается не менее 95% всех имеющихся значений, под ней — оставшиеся 5% точек. Согласно статистической терминологии, эта линия — 95%-ый квантиль распределения точек, гарантирующий, что все входящие в него результаты измерения оказываются выше этого значения с 95%-ой вероятностью.

Тогда значение  $E_{AL}$ , указанное на рисунке, — корректировка показаний анализатора, которую мы должны были бы закладывать в ИОЧ при оптимизации рецепта в реальном времени, если бы хотели, чтобы результаты 95% лабораторных измерений по этому качественному показателю оказались не ниже требований спецификаций.

Основываясь на предыдущих рассуждениях и введя корректировку показаний анализатора  $E_{AL}$ , можно с 95% вероятностью утверждать, что смешанная партия бензина будет сертифицирована лабораторией (теоретически 1 из 20 смесений может оказаться забракованным). Аналогичный подход можно применять при получении оценки  $E_{AL}$  для 99%-й или 90%-й вероятностей.

Пересчет оценки  $E_{AL}$  необходимо делать периодически, чтобы отслеживать возможные изменения параметров точности анализаторов из-за технологических изменений или изменений рабочих характеристик самого прибора. В табл. 4 приведены результаты дополнительного анализа данных ОНПЗ для оценки  $E_{AL}$  с различными вероятностями. Например, для ИОЧ бензина Премиум-95 значение 95-й оценки  $E_{AL}$  равно -0,2. Это означает, что если вести смещение так, чтобы анализатор показывал не ниже 95,2, то теоретически только для одной из 20 смешанных партий бензина результат измерения лаборатории окажется ниже 95. Аналогично, для 99%-й оценки  $E_{AL}$  необходимо ориентироваться на показания не ниже 95,35, тогда получение брака возможно для 1 из 100 партий.

Если учесть полученные ранее средние отклонения показаний анализатора от лаборатории, то можно оценить среднее значение отдачи качества, которое получится, если вести процесс в режиме on-line по анали-

затору с корректировкой  $E_{AL}$  (отдача качества будет равна разнице между значением  $d$  и  $E_{AL}$ ). Согласно результатам расчета из табл. 4, для 95%-й вероятности отдачи качества по ИОЧ для бензина Премиум-95 составит 0,13, а при 99%-й вероятности — 0,28.

### Лаборатория как инструмент повышения эффективности управления станцией смешения

Применение средств оптимизации как на уровне off-line, так и на уровне on-line позволяет получать максимальный экономический эффект от смешения, и ключевой фактор, ограничивающий этот эффект, — точность измерения свойств компонентов и продуктов в лаборатории.

Лаборатория технического контроля занимается сертификацией качества товарных бензинов, что определяет ее ключевую роль в управлении товарным производством по следующим причинам:

- от точности лабораторного измерения свойств товарных бензинов зависит отдача качества, которую необходимо принимать во внимание при управлении смешением на АССБ. То есть погрешность метода измерения свойства бензина в лаборатории необходимо учитывать при задании граничных значений спецификации в качестве уставок для системы off-line управления смешением товарных бензинов;

- от точности измерения свойств товарных бензинов в лаборатории напрямую зависит и точность калибровочной модели поточного NIR анализатора (который калибруется по выборке опорных значений свойств, измеренных в лаборатории), а точность поточного анализатора, в свою очередь, определяет точность управления в on-line системе оптимизации;

- точность измерения лаборатории определяет величину «небраковочной границы» измеряемого свойства — чем точнее измерение, тем меньше должна быть «небраковочная граница». Нужно также принять во внимание, что величина небраковочной границы зависит не только от точности измерений лаборатории, но и от точности измерений свойства у потребителя. То есть правильней сказать, эту величину определяет точность стандартного метода испытаний, а не только внутрिलाбораторная погрешность НПЗ;

- проведенный выше анализ погрешностей off-line и on-line систем управления показал, что погрешности  $E_L$ ,  $E_Q$ ,  $E_A$ ,  $E_N$  определяются качеством работы лаборатории (только погрешность реализации рецептуры зависит от типа расходомеров и регулирующих клапанов).

Таким образом, от эффективности работы лаборатории зависит эффективность всей системы управления смешением бензинов.

Отметим также, что эффективная работа поточного анализатора возможна только при актуализации калибровочной модели по лабораторным измерениям стандартными методами. К сожалению, этот факт редко осознают на НПЗ, особенно на начальных этапах внедрения ИК-анализаторов, полагая, что

после создания начальной калибровочной модели объем ходового контроля может быть сокращен благодаря наличию поточного прибора. Большинство поставщиков ИК-анализаторов на этапе продажи не акцентируют внимание на том, что поддержание рабочей модели анализатора требует существенной дополнительной нагрузки на лабораторию. В результате значительная часть мировых внедрений ИК-анализаторов оказывается лишь бесполезной тратой денег (отметим, что внедрение анализатора, как правило, обходится НПЗ не менее 1 млн. долл. США). В то же время на предприятиях, уделяющих внимание поддержанию калибровочной модели в актуальном состоянии, их использование обеспечивает быструю окупаемость затрат и получение дополнительной прибыли за счет оптимизации смещения.

В настоящее время во многих нефтяных компаниях существует тенденция по сокращению штата лаборатории, что мотивируется, как правило, тем, что используются поточные и виртуальные анализаторы, которые могут заменить лабораторные измерения. При этом не принимается во внимание, что указанные анализаторы не только используют математические модели, построенные на основании лабораторных измерений, но эти математические модели нуждаются в систематической коррекции по результатам измерений лаборатории (см. ASTM D6122-99 Standard Practice for Validation of Multivariate Process Infrared Spectrophotometers). Необходимо отметить, что использование универсальных поточных и виртуальных анализаторов способно значительно повысить эффективность производства за счет повышения частоты измерения и применения полученных показаний в системах управления. В то же время, даже если на этапе внедрения анализаторов для них были созданы идеальные калибровочные модели, сокращение штата лаборатории неизбежно приведет к невозможности обеспечения требуемого уровня поддержки этих моделей и их деградации. Соответственно, получив выигрыш от снижения расходов на лабораторию, предприятие теряет гораздо большие деньги из-за снижения эффективности работы систем, использующих анализаторы в качестве источников данных реального времени.

Требует отдельного обсуждения вопрос о необходимости параллельных измерений. При проведении паспортизации число результатов измерений в условиях повторяемости определяется требованиями стандартного метода испытаний, и для некоторых методов полученный для паспортизации результат представляет собой среднее арифметическое двух результатов измерений. Но даже при отсутствии таких требований, для некоторых показателей качества в лаборатории проводят контроль в условиях повторяемости (например, для объемной доли бензола). Параллельные измерения могут существенно повысить точность калибровочной модели поточного анализатора. Поэтому представляет интерес оценка экономической эффективности такого мероприятия.

Лаборатория является также ответственным подразделением НПЗ перед заказчиками на соответствие товарных бензинов ГОСТам. При этом ключевым вопросом является допустимая отдача качества по октановым числам, которая в большой степени определяет экономическую эффективность товарного производства. При понятном желании НПЗ максимально снизить эту величину отдача качества определяется, в конце концов, точностью измерения октанов в лабораториях производителя и потребителя. Эту погрешность можно уменьшить параллельными измерениями октановых чисел, что приведет к некоторой дополнительной нагрузке на лабораторию, но экономически может оказаться эффективным.

Как известно, параллельные измерения уменьшают случайную ошибку измерения обратно пропорционально квадратному корню из числа параллельных измерений. Например, если выполнить два измерения одного и того же образца и принять их среднее значение в качестве результата измерения, то при нормальном законе распределения получим уменьшение ошибки примерно в 1,41 раза. Конечно, введение параллельных измерений приведет к росту затрат на дополнительные реактивы и трудозатраты операторов. Возможно, потребуются также финансирование дополнительных сотрудников лаборатории.

Однако, как показывают проведенные расчеты, использование двух параллельных измерений позволяет снизить отдачу качества по октанам на 0,12, что даже при учете дополнительных затрат лаборатории позволит получить эффект 10 млн. руб./г.

В заключение отметим, что цели лаборатории, как ключевого звена в системе управления товарным производством и повышения его эффективности, состоят в решении двух задач:

- повышении точности измерений свойств товарных бензинов, то есть уменьшения внутрилабораторной прецизионности  $R_d$  (ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002);
- использовании при определении свойств товарных бензинов вместо единичного измерения параллельных измерений с последующим их усреднением. Этим повысится точность измерений свойств бензинов в лаборатории, и тем самым повысится экономическая эффективность систем off-line и on-line оптимизации, определяемая отдачей качества измеряемого свойства.

#### Выводы

Небраковочные границы свойства являются «платой» за неустраняемую погрешность измерения свойства в лаборатории и представляют собой компромисс между экономической эффективностью процесса смещения и репутационными и финансовыми рисками из-за возможных рекламаций со стороны покупателя и штрафных санкций со стороны государства. Регламентация их использования повысит прозрачность работы лаборатории и контроля качества товарного бензина на НПЗ.

Классификация и анализ источников погрешностей off-line и on-line оптимизации (погрешности свойств компонентов, реализации рецептуры, поточного анализатора, нелинейного моделирования) позволяет выделить направления повышения точности управления смещением бензинов и его эффективности.

Проверка адекватности калибровочной модели NIR анализатора по лабораторным данным на степень корреляции, а также на статистическую значимость отклонений от лабораторных измерений дает возможность получить объективную оценку качества работы поточного анализатора.

Предложенный в статье подход к статистическому анализу разностей показаний анализатора и лаборатории позволит определить значение требуемой корректировки показаний поточного анализатора, а также минимально допустимые пределы значений качественных показателей при оптимизации.

Лаборатория играет одну из ключевых ролей в повышении эффективности систем off-line и on-line оптимизации процессов смешения товарных бензинов. Все значимые погрешности моделирования, оптимизации и управления зависят от точности измерения нормируемых свойств бензинов в лаборатории. Внедрение систем поточного анализа способно частично снизить нагрузку на нее, но лишь до относительно небольшой степени. Стремление же к существенному сокращению затрат в области лабораторного контроля после внедрения on-line систем анализа качества нефтепродуктов в конечном итоге способно приве-

сти к более значительным потерям из-за снижения эффективности производства.

#### Список литературы

1. Дудников Е.Е., Цодиков Ю. М. Типовые задачи оперативного управления непрерывным производством. М.: Энергия. 1979.
2. Соркин Л.Р., Хохлов А.С., Ефитов Г.Л., Цодиков Ю.М., Хоботов Е.Н. Опыт оптимизации текущего и оперативного планирования на российских нефтеперерабатывающих заводах с использованием программных продуктов корпорации Honeywell // Автоматизация в промышленности. 2004. №11.
3. Шестаков Н.В., Ефитов Г.Л. Специализированные прикладные компьютерные системы и комплексы как инструмент снижения затрат в нефтепереработке // Нефтяное хозяйство. 1998. №8.
4. Аносов А.А., Ефитов Г.Л., Пузин Д.Г. Автоматизированная система оптимального управления станцией смешения бензинов на НПЗ // Автоматизация в промышленности. 2010. №4.
5. Wei Wang, Zefer Li, Qiang Zhang, Yankai Li. On-line optimization model design of gasoline blending system under parametric uncertainty. Proceeding of the 15th Mediterranean Conference on Control & Automation. 2007. Athens, Greece.
6. Аносов А.А., Ефитов Г.Л., Зусман С.Д. Опыт использования ИК-спектроскопии для измерения свойств бензинов на НПЗ // Автоматизация в промышленности. 2012. № 7.
7. Аносов А.А., Ефитов Г.Л., Зусман С.Д. Задачи оптимизации смешения товарных бензинов в реальном времени с использованием поточного анализа качества смеси // Автоматизация в промышленности. 2013. №6.
8. Аносов А.А. Ефитов Г.Л. Оптимальное управление компаундированием топлив — задачи, решения, опыт в России // Автоматизация в промышленности. № 4. 2015.

**Аносов Андрей Александрович** — канд. техн. наук, нач. отдела,  
**Ефитов Григорий Леонидович** — канд. техн. наук, ст. консультант,  
**Шайдуллин Ренат Анварович** — консультант АО «Хоневелл»,  
**Голованов Юрий Владимирович** — канд. хим. наук, нач. ЛТК,  
**Королев Андрей Владимирович** — зам. нач. ЛТК ОАО «Газромнефть — ОНПЗ».  
 Контактные телефоны: 7(495)797-99-44, 796-98-00.  
 E-mail: grigory.efitov@honeywell.com

#### ПЛК К-2000/М компании СИНКРОСС и ISaGRAF в автоматизированных системах пожаротушения: успешные проекты на объектах АК Транснефть

Компании СИНКРОСС и ФИОРД информируют об успешном многолетнем опыте использования ПЛК К-2000/М и технологии программирования ISaGRAF в автоматизированных системах пожаротушения на объектах АК «Транснефть».

ПЛК К-2000/М компании СИНКРОСС предназначен для преобразования сигналов от первичных преобразователей неэлектрических величин (температура, давление, вибрация), расположенных во взрывоопасных зонах, обработки сигналов и формирования управляющих воздействий по заданному алгоритму, обеспечение визуализации текущего состояния входных сигналов от компонентов системы в виде таблиц, мнемосхем, трендов и т.д.

Контроллер может быть использован в качестве регистратора физических величин до 32 каналов без дополнительного устройства ввода/вывода. Контроллер предназначен для эксплуатации вне взрывоопасных зон как автономно, так и в составе систем контроля, управления, защиты и сигнализации (в том числе пожарной), объединенных в сеть интерфейсами. Контроллер К-2000/М оптимально подходит в качестве логического ядра при построении средних и малых систем сбора, обработки информации и управления процессами.

На базе данного контроллера создан комплекс технических средств охранно-пожарной сигнализации и управления пожароту-

шением КТС-2000, много лет успешно решающий задачи автоматизации технологических процессов и обеспечения безопасности работы предприятий нефтегазовой, нефтехимической, перерабатывающей отраслей промышленности, а также объектов министерства обороны России. В качестве инструмента программирования прикладных задач в контроллере К-2000/М используется среда разработки ISaGRAF Workbench (версия 5 или 6). Исполнительная часть технологии программирования ISaGRAF выполняется под управлением ОС PV QNX Neutrino. Мнемосхемы реализуются с помощью инструмента для визуального построения графических интерфейсов пользователя Photon Application Builder, входящего в состав QNX Momentics.

На ISaGRAF реализована наиболее ответственная часть системы автоматического обнаружения и тушения пожара промышленных объектов: контроль состояния пожарных извещателей (дымовых, оптических, температурных, ручных), контроль и управление запорной арматурой (электроздвижки), насосами (как насосами пожаротушения, так и другими агрегатами вспомогательных систем), баками-дозаторами. Также реализована передача данных по OPC на АРМ оператора, сохранение уставок в памяти контроллера.

[Http://sinkross.ru](http://sinkross.ru)