

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВСПЫШКИ: ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Потребность в разработке в первую очередь безопасных процессов стала причиной использования анализа для определения свойства чистых жидкостей и смесей жидкостей, которое называется температурой вспышки. Температура вспышки жидкости определяется как минимальная температура, скорректированная относительно барометрического давления 101,3 кПа, при которой пары жидкости будут кратковременно воспламеняться при наличии вблизи источника воспламенения. Термин «вспыхивание» жидкости описывает условия, когда в паре, образованном жидкостью, возникает и распространяется пламя [1]. При температуре вспышки воспламеняющийся пар над жидкостью достигает концентрации, которая оказывается достаточно высокой и преодолевает нижний предел воспламеняемости [2]. Разработано несколько различных методов испытаний для определения температуры вспышки горючих жидкостей, и большинство этих методов являются стандартами *ASTM* (Американское общество по материалам и испытаниям). В настоящей статье мы дополнительно разъясним значимость испытаний температуры вспышки и более подробно рассмотрим эти различные методы испытаний.

В чем заключается важность определения температуры вспышки?

Температура вспышки является критически важным свойством горючих жидкостей. Температуру вспышки необходимо знать для хранения и транспортировки горючих жидкостей, чтобы обслуживающий персонал смог принять соответствующие меры предосторожности при работе с летучими веществами и не допустить случайного воспламенения. Также важно отметить, что при температуре вспышки пламя, создаваемое источником воспламенения, будет гореть только в течение короткого времени, и горение, как правило, прекращается при устранении источника воспламенения. При дальнейшем на-

греве жидкости достигается другая температурная точка, называемая температурой воспламенения, при которой пар жидкости будет продолжать гореть более 5 с.

Помимо вопроса безопасности и воспламеняемости, температуру вспышки можно использовать в комбинации с другими свойствами, например, вязкостью и плотностью, для оценки качества эксплуатируемого жидкого масла и способа переработки отработанного масла. Еще одним аспектом, который можно прояснить в ходе испытаний температуры вспышки, является разбавление масла топливом. В испытании в закрытом тигле малого объема небольшая проба масла подвергается действию источника воспламенения. Если происходит воспламенение пробы, то образец масла не проходит испытание, что обычно указывает на определенную степень разбавления его топливом. Как правило, такое испытание осуществляется посредством нагрева пробы до температуры, которая соответствует 1–2 % разведению, и эта температура обычно оказывается гораздо ниже температуры вспышки нового базового масла.

Температура вспышки может использоваться для определения других возможных характеристик отработанного масла, например, возникновения крекинга базового масла, загрязнения масла, использования неправильного масла и испарения определенных компонентов масла. В большинстве случаев крекинг базового масла приводит к понижению температуры вспышки масла, а загрязнение может повышать или понижать температуру вспышки в зависимости от того, какие вещества попали в масло. Что касается различных типов базового масла, то синтетические масла, как правило, будут иметь более высокую температуру вспышки по сравнению с минеральными маслами. В табл. 1 показаны факторы, которые могут изменять температуру вспышки, и иллюстрируются возможности применения температуры вспышки в аналитических испытаниях [1].

Методы испытаний для определения температуры вспышки

В отношении испытаний температуры вспышки существуют два основных метода – с открытым тиглем и с закрытым тиглем. В испытании с открытым тиглем проба жидкости помещается в контейнер, который не защищен от атмосферного воздействия. Источник воспламенения размещается непосредственно над открытым тиглем. Температура вспышки может варьироваться в зависимости от расстояния между жидкостью и источником воспламенения. Метод с закрытым тиглем очень похож на испытание с открытым тиглем, за исключением того, что проба жидкости находится в закрытом сосуде, который защищен от воздействия атмосферы. Воспламенение паров происходит в закрытом сосуде на гораздо более близком расстоянии от пробы жидкости. Методы испытаний с закрытым тиглем, как правило, оказываются предпочтительней, поскольку в таких испытаниях обычно получают более низкие температуры вспышки по причине близости источника воспламенения к жидкости. В отрасли в целях предосторожности распространена практика маркировки горючих жидкостей. Кроме того, при использовании метода с закрытым тиглем возможные колебания условий окружающей среды в лаборатории будут в меньшей степени влиять на проведение испытания [3].

Каждый из методов испытаний для определения температуры вспышки отличается прежде всего типом испытуемого материала и температурным диапазоном. Испытание по методу Пенски-Мартенса, являющееся стандартом *ASTM D93*, представляет собой испытание с закрытым тиглем, которое можно применять в отношении масел в диапазоне температур от 40 °С до 360 °С. Метод *A* этого испытания применяется конкретно в отношении новых смазочных масел и дистиллятных топлив. Метод *B* этого испытания используется для эксплуатируемых и отработанных масел, остаточных топлив, смесей нефтяных жидкостей и твердых частиц, или нефтяных жидкостей, которые могут образовывать пленку на поверхности во вре-

мя испытания. Для этого испытания необходима проба объемом, по меньшей мере, 75 мл. В настоящее время появилось много новых альтернативных топлив, но для этих новых топлив также можно использовать типовые методы испытаний. Так, к примеру, температуру вспышки биодизеля *B100* можно определить с помощью стандарта *ASTM D93*. Стандарт *D93* также использовался для определения температуры вспышки смеси биотоплива (70 % карданола и 30 % керосина) в испытании для тестирования его рабочих характеристик в дизельных двигателях [4, 5, 6].

Автоматический прибор с закрытым тиглем Пенски-Мартенса для определения температуры вспышки производства компании *Koehler Instrument Company*, показанный на рис. 1, представляет собой пример прибора, который, помимо прочих стандартов, подходит для методик *A*, *B* и *C* *ASTM D93*. Диапазон рабочих температур может начинаться от температуры окружающей среды и доходить до 400 °С. Скорость перемешивания может составлять от 0 до 300 об./мин со временем цикла 5 мин. В приборе используется двойная система вентиляторов, которая охлаждает непосредственно тигель и среду, окружающую испытательный тигель. Дополнительным аспектом безопасности является система подавления возгорания посредством подачи инертного газа, которая входит в состав прибора. В прибор интегрирован процессор, работающий с программным обеспечением *Windows*, и его показания отражаются на сенсорном экране размером 8,4 дюйма, при этом имеется возможность использовать множество дополнительных программ пользователя. Прибор полностью автоматизированный, в нем имеется механическая подъемная система для крышки и моторчика, что позволяет проводить испытания одним нажатием. Температура вспышки определяется термпарой и кольцом ионизации, а сам прибор поставляется в вариантах с электрическим или газовым поджигом пробы [7].

Метод с тиглем Тага по стандарту *ASTM D56* является еще одним испытанием с закрытым ти-

Таблица 1

Влияние различных изменений в масле на его температуру вспышки [1]		
	Понижает температуру вспышки	Повышает температуру вспышки
Изменения химического состава масла	– Термический крекинг – Излучение (крекинг под действием гамма-лучей) – Микродизельный эффект	– Полимеризация
Загрязнители масла	– Дизельное топливо – Бензин – Природный газ – Растворители – Неправильное масло подпитки – Вода (помеха для приборов)	– Вода – Угольная пыль – Гликоль/антифриз – Неправильное масло подпитки
Потеря компонентов масла		– Термическое испарение (выкипание легких фракций) – Вакуумная сушка

глем. Это испытание предназначено для маловязких жидкостей. Жидкости должны иметь вязкость меньше $0,5 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $40 \text{ }^\circ\text{C}$ или вязкость меньше $9,5 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Кроме того, температура вспышки жидкости также должна опускаться ниже $93 \text{ }^\circ\text{C}$. В аппарате с тиглем Тага объем пробы, в отличии от прибора с закрытым тиглем Пенски-Мартенса, составляет 50 мл [8, 9].

Метод с открытым тиглем Кливленда (*ASTM D92*) используется для определения температуры вспышки и температуры воспламенения. Это испытание предназначено для нефтепродуктов с температурой вспышки от $79 \text{ }^\circ\text{C}$ до $400 \text{ }^\circ\text{C}$, за исключением всех мазутов. Для испытания в открытом тигле Кливленда требуется проба объемом 70 мл [10].

Испытание в закрытом тигле по Абелю является стандартом Международной организации по стандартизации. Оно предназначено для испытания горючих жидкостей с температурой вспышки от $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ до $75 \text{ }^\circ\text{C}$. Однако в стандарте указывается, что прецизионный результат можно получить только в диапазонах температуры вспышки от $-8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ до $75 \text{ }^\circ\text{C}$ [11].

Метод *ASTM D3828* представляет собой испытание в закрытом тигле малого объема, для которого требуется образец объемом 2–4 мл, а само испытание длится 1–2 мин. Это испытание охватывает очень широкий диапазон температур, от $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ до $300 \text{ }^\circ\text{C}$, и позволяет анализировать различные нефтепродукты и биодизельные топлива. Метод А этого испытания касается определения вспышки пробы при определенной температуре, подобно изложенному в предыдущем разделе,

а метод В является типичным испытанием для определения температуры вспышки пробы [12].

Оригинальные испытания с тиглями Пенски-Мартенса и Тага были разработаны более 100 лет назад, и с той поры были предприняты многочисленные усилия в целях разработки более безопасных испытаний, поскольку, в зависимости от типа масла, воспламенение пробы объемом 70 мл может быть достаточно опасным. В 1999 г. *ASTM International* разработало стандарт *ASTM D6450*, который стал первым методом с постоянно закрытым тиглем, а в 2004 г. был разработан стандарт *ASTM D7094*, который явился модифицированным методом с постоянно закрытым тиглем. В этом испытании используется проба объемом 2 мл, и после каждого воспламенения в тигель вводится свежий воздух. При этом объем воздуха увеличивается по мере увеличения температуры пробы. После проведения многочисленных испытаний, которые по сути дали результаты, аналогичные полученным при испытании по методу Пенски-Мартенса, в 2013 г. стандарт *ASTM D7094* официально был признан в качестве альтернативного метода испытаний для определенных типов топлив, например, мазутов, дизельных топлив, газотурбинных топлив и керосинов [13].

Заключение

Температура вспышки горючей жидкости является очень важной характеристикой, определяемой уже на протяжении более 100 лет. Она особенно полезна для установления нижних пределов воспламеняемости жидкостей и для раз-



Рис. 1. Блок крышки/мотора и сенсорного дисплея автоматического прибора с закрытым тиглем Пенски-Мартенса для определения температуры вспышки [7]

работки отраслевых стандартов по хранению и транспортировке таких жидкостей. За это время было разработано множество методов испытаний, зависящих от конкретных характеристик жидкости, и каждый метод в той или иной мере используется в отрасли. В силу этого, необходимо иметь общее представление о различном применении температуры вспышки и различных методах испытаний, особенно в том, что касается нефтяной отрасли и области трибологии.

Авторы статьи выражают признательность Рею Монтемайеру, видному эксперту в области проведения испытаний то определению температуры вспышки и автором публикации *ASTM* «Практика определения температуры вспышки: лабораторные возможности», за его помощь в работе над настоящей статьей.

Об авторах

Доктор Радж Шах (*Dr. Raj Shah*) занимает должность директора в компании *Koehler Instrument Company* в Нью-Йорке, в которой он работает уже на протяжении 25 лет. Он является выбранным членом таких организаций как *IChemE*, *CMI*, *STLE*, *AIC*, *NLGI*, *INSTMC*, Институт энергетики и Королевское химическое общество. Шах является лауреатом награды *ASTM Eagle*, а недавно он в сотрудничестве с другими авторами опубликовал снискавшую большой успех работу «Пособие по топливам и смазочным маслам», которую можно найти в интернете по адресу https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/MNL/SOURCE_PAGES/MNL37-2ND_foreword.pdf.

Доктор Шах имеет степень в области химической инженерии в университете Пенсильвании, является членом совета Дипломированного института управления в Лондоне, дипломированным научным сотрудником Научного совета, дипломированным инженером-нефтяником в Институте энергетики и дипломированным инженером Инженерно-технического совета Великобритании. Доктор Шах является внештатным преподавателем отделения материаловедения и химической инженерии в университете штата Нью-Йорк, его перу принадлежат более 300 публикаций, и он уже на протяжении 30 лет проводит активные исследования, касающиеся различных видов нефтепродуктов. Более подробные сведения об авторе можно найти на сайте <https://www.petro-online.com/news/fuel-for-thought/13/koehler-instrument-company/dr-raj-shah-director-at-koehlerinstrument-companyconferred-with-multifariousaccolades/53404>.

Натан Арагон (*Nathan Aragon*) является слушателем курса химической инженерии в университете Стоуни-Брук, в котором доктор Шах работает внештатным преподавателем и является предсе-

дателем независимого консультативного совета в рамках отделения материаловедения и химической инженерии.

Список литературы

1. Fitch J. "How to test flash point." Machinery Lubrication. <https://www.machinerylubrication.com/Read/19/flash-point-test>.
2. Vidal M., Rogers W. J., Holste J. C., and Mannan, M. S. "A Review of Estimation Methods for Flash Points and Flammability Limits." Process Safety Progress, vol. 23, March 2004. DOI: 10.1002/prs.10004.
3. "Open and Closed Cup Flash Point – What is the Difference?" Petro Industry News, June 26, 2014. <https://www.petro-online.com/news/analytical-instrumentation/11/breaking-news/open-and-closed-cup-flash-point-ndash-what-is-the-difference/30654>
4. ASTM Standard D93, "Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
5. Alleman T. L. and McCormick R. L. "Biodiesel Handling and Use Guide." United States Department of Energy, November 2016.
6. Ravindra A. M. and Vardhan H. "Performance Testing of Diesel Engine using Cardanol-Kerosene oil blend." MATEC Web of Conferences 144, 04005 (2018).
7. "Automatic Pensky-Martens Closed Cup Flash Point Tester," Koehler Instrument Company, Inc. <https://koehlerinstrument.com/products/automatic-pensky-martens-closed-cup-flash-point-tester/>
8. ASTM Standard D56-16a, "Standard Test Method for Flash Point by Tag Closed Cup Tester," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
9. Mladin D. "Flash Point Testing Methods ASTM D56 and ASTM D93." Dell Tech, April 2020. <https://delltech.com/blog/flash-point-testing-methods-astm-d56-and-astm-d93/#:~:text=Chemical%20Retail%20Labels%3A%20Consumer%20Chemicals%20and%20Containers%20Regulations,viscosity%20higher%20than%205.8%20mm%2F%20at%2037.8%20C>.
10. ASTM Standard D92-05a, "Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.
11. ISO 13736:2021, "Determination of Flash Point – Abel closed-cup method," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2021.
12. ASTM Standard D3828-16a, "Standard Test Methods for Flash Point by Small Scale Closed Cup Tester," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
13. Wagner C. and Schwarzmann A. "ASTM D7094 - Modified Continuously Closed Cup Flash Point Standard Accepted as a Safe Alternative Method in Various Fuel Specs." Petro Industry News, February/March, 2014.

¹В Российской Федерации планируется утверждение методов ГОСТ, идентичным методам *ASTM D6450* и *D7094* – прим. науч. ред.