

потока. Следовательно, для нестационарных течений жидкости необходимо иметь соответствующие выражения для коэффициентов истечения и скорости входа. В случае измерений расхода нестационарного потока газа должен быть найден соответствующий коэффициент расширения. Основные положения предложенного метода необходимо проверить, одновременно измерив частоты пульсаций потока на определённом участке трубопровода и скорость потока, т. е. установив зависимость коэффициента истечения сужающего устройства от числа Струхала. С увеличением частоты пульсаций при одной и той же скорости потока регистрируемый расход вещества должен увеличиваться, приобретая дополнительное ускорение (см. рис. 1). После получения экспериментальных данных метод можно будет распространить на реальные жидкости и газы.

Таким образом, выведено уравнение Бернулли для нестационарного потока идеальной жидкости, из которого оп-

ределены аналитические выражения, составляющие основу предложенного метода измерений расхода пульсирующего потока идеальной жидкости как базовой модели для построения методик измерений расхода и количества реальных жидкостей и газов.

Л и т е р а т у р а

1. **Кремлёвский П. П.** Расходомеры и счётчики количества веществ. Справочник. Л.: Машиностроение, 1989.
2. **Tweten D., Nored M., Brun K.** The Physics of Pulsations // Conf. Gas Machinery. Albuquerque, 2008. P. 1—16.
3. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теоретическая физика. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.

Дата принятия 12.03.2015 г.

531.787.089.6:665.6

Разработка эталонной установки для метрологического обеспечения измерений давления насыщенных паров нефти и нефтепродуктов

О. С. ВИТКОВСКИЙ¹, М. Я. МАРУСИНА²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: O. S. Vitkovskiy@vniim.ru

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики ИТМО, С.-Петербург, Россия, e-mail: marusina_m@mail.ru

Представлены результаты разработки эталонной установки нового метода для измерений давления насыщенных паров нефти и нефтепродуктов. Приведены характеристики стандартных образцов, аттестуемых на установке. Обоснованы преимущества устройства перед зарубежными аналогами, показаны перспективы его автоматизации и утверждения в качестве рабочего эталона.

Ключевые слова: эталон, давление насыщенных паров, нефтепродукты, анализаторы, стандартные образцы.

The results of the development of a reference device for measurement of saturated vapor pressure in oil and oil products are presented. A new method is described for the measuring of saturated vapour pressure, which forms the basis of the developed reference device. The characteristics are given of the reference materials certified using the reference device. The advantages of this device are demonstrated compared to foreign-made similar devices. The perspective of automatic performance and approval of the device as a working measurement standard are shown.

Key words: measurement standard, saturated vapour pressure, oil product, analyzers, reference materials.

Давление насыщенных паров (ДНП) — одна из важнейших характеристик при оценке качества нефти и нефтепродуктов. Оно определяет эксплуатационные свойства нефтепродуктов, таких как различные виды топлива, масел, растворителей и т. д., а также результаты расчётов технологических процессов [1].

Цена на нефть и нефтепродукты напрямую зависит от их качества, поэтому необходимо обеспечивать контроль как на стадии добычи и транспортировки, так и при переработке и хранении. При хранении и транспортировке нефти и нефтепродуктов невозможно обойтись без потерь. Больше половины всей массы технологических утечек приходится на

выделяющиеся из нефтепродуктов углеводороды, количество которых, при прочих равных внешних условиях, зависит от испаряемости, напрямую связанной с ДНП и содержанием в нефти растворённых и свободных газов. Без должного контроля этих параметров невозможно выявить основные причины потерь и принять соответствующие меры по их предотвращению [2—4].

В России ДНП определяют методом, основанным на использовании прибора под названием Бомба Рейда [1]. В международном стандарте [5] отмечено, что измеренное таким образом ДНП приблизительно соответствует ДНП испытуемого продукта при 37,8 °С, при этом его погреш-

ность не регламентирована. Согласно [1], точность метода получают при статистической обработке результатов межлабораторных испытаний, но этого недостаточно.

С 2002 г. в России для измерений ДНП начали возникать новые способы и средства измерений (СИ), реализующие современные методы, например такие, как анализаторы ДНП. Они используются в нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности [6, 7]. Анализаторы являются компактными, полностью автоматизированными приборами, позволяющими быстро и точно определять ДНП невязких жидкостей. В их состав входят: измерительная камера; датчики давления и температуры; термоэлектрический модуль; устройство отбора проб; приёмный контейнер; буквенно-цифровой дисплей; встроенное программное обеспечение.

Первыми в России появились анализаторы MINIVAP VPS и MINIVAP VPSH (GRABNER INSTRUMENTS, Австрия), предназначенные для измерений ДНП нефти, невязких углеводородов и растворителей, в том числе бензина, а также смесей бензина с оксигенатами в соответствии с требованиями стандартов [8–10]. В то же время были зарегистрированы анализаторы SETAVAP II (STANHOPE-SETA, Англия) — настольные автоматизированные приборы для быстрых и точных измерений ДНП бензина, растворителей, нефти и подобных веществ. Такие анализаторы применяют также в системах транспортирования, хранения, потребления топлива, лабораториях контроля качества нефтепродуктов. Программное обеспечение подобных приборов позволяет рассчитывать ДНП в соответствии со стандартами [1, 9, 11–15]. Относительная погрешность перечисленных анализаторов составляет порядка 5 %.

С появлением зарубежных анализаторов стали необходимы испытания с целью утверждения типа. До 2002 г. в России метрологическое обеспечение в области измерений ДНП находилось на столь низком уровне, что не могло обеспечить решение данной задачи. Кроме того, не существовало прибора, который не уступал бы по метрологическим характеристикам данным анализаторам. Поэтому во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева было разработано, исследовано и внедрено устройство для измерений давления насыщенных паров (УДНП), где в основу положен новый метод, базирующийся на фундаментальной теории и экспериментальных исследованиях. Разработанное устройство

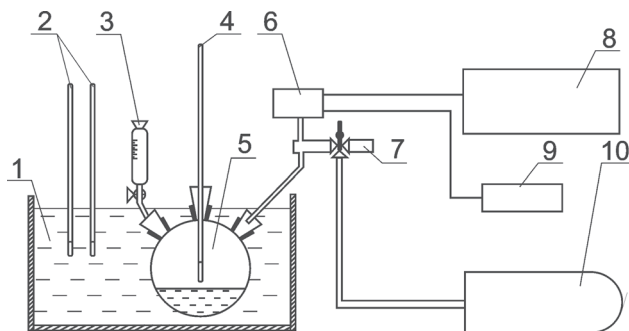
внесено в Государственный реестр СИ (рег. № 23264-02). Структурная схема установки приведена на рисунке.

Суть метода заключается в следующем. В измерительную камеру 5 через входной клапан 3 подавали испытуемый образец ДНП (стандартный образец на основе гексана), охлажденный до +3 °С, в таком количестве, чтобы создать в камере соотношение объемов пар—жидкость 4:1. После заливки образца входной клапан закрывали и открывали откачной клапан 7, соединяющий измерительную камеру с насосом 10. Процесс вакуумизации измерительной камеры заканчивали в тот момент, когда показания датчика давления 6, индицирующиеся на дисплее вольтметра 8, переставали уменьшаться, после чего откачной клапан закрывали. При определении ДНП необходимо учитывать остаточное давление $P_{ос}$ в камере. После закрытия всех клапанов с помощью термостата 1 нагревали измерительную камеру и испытуемый образец до 37,8 °С. Отсчёт проводили по термометру 4. При этой температуре установившееся в измерительной камере давление соответствует ДНП испытуемого образца за вычетом остаточного давления: $P_{ДНП} = P_{и} - P_{ос}$, где $P_{и}$ — давление испытуемого образца; $P_{ос}$ — остаточное давление. Предложенный пневматический метод прямого откачивания содержит новый подход к измерению ДНП при обновлённых конструктивных решениях по сравнению с существующими методами (Бомба Рейда и анализаторы ДНП) и соответствует нормативной документации.

По метрологическим характеристикам УДНП превосходит зарубежные анализаторы из-за использования в нём современного цифрового преобразователя давления, специальной измерительной камеры и пневматического метода для создания разрежения в ней.

С помощью данного устройства была решена проблема поверки анализаторов, для чего разработали методики, а также способы испытаний для утверждения типа данных приборов с применением стандартных образцов (СО). Уровень метрологических характеристик УДНП позволил применить его для аттестации СО абсолютного ДНП нефтепродуктов. Диапазон измерений составил 0—160 кПа, пределы допускаемой приведенной погрешности устройства $\pm 0,25$ %. Давление насыщенных паров жидкости измеряли с помощью высокоточного преобразователя, герметично подсоединённого к измерительной камере с определенным количеством исследуемой жидкости. После откачки воздуха из камеры последнюю помещали в термостат и при достижении заданной температуры определяли установившееся в ней давление, которое и являлось ДНП исследуемой жидкости. Таким образом, устройство позволило непосредственно измерять ДНП, в отличие от зарубежных анализаторов, определяющих скорректированное давление, запрограммированное для конкретных методов.

С помощью разработанного устройства можно с высокой точностью находить ДНП различных жидкостей и применять его не только для контроля качества продукции, выпускаемой нефтеперерабатывающими и нефтехимическими предприятиями, но и для научно-исследовательских работ, а также при создании СО. В их число входят СО абсолютного ДНП нефтепродуктов, предназначенные для калибровки и поверки СИ ДНП нефтепродуктов, аттестации методик измерений, контроля достоверности результатов испытаний нефтепродуктов [1, 8, 11, 12, 16, 17]. Аттестуются они только на УДНП, поскольку прибора с лучшими точностными ха-



Структурная схема устройства для измерений давления насыщенных паров:

1 — термостат; 2 — термометры термостата; 3 — делительная воронка; 4 — измерительный термометр; 5 — колба трехгорлая; 6 — преобразователь давления; 7 — трёхходовой кран; 8 — вольтметр; 9 — блок питания; 10 — вакуумный насос

рактическими в России в настоящее время не существует. Ряд образцов абсолютного ДНП, выпускаемых во ВНИИМ и пользующихся спросом, представлен в таблице.

Стандартные образцы

Регистрационный номер	Индекс	Интервал допускаемых значений ДНП при 37,8 °С, кПа	Относительная погрешность СО, %
09.02.001	АДНП-10	8—12	4,0
09.02.002	АДНП-20	16—24	2,5
09.02.003	АДНП-30	24—36	2,5
09.02.004	АДНП-40	39—49	2,5
09.02.005	АДНП-50	50—60	2,5
09.02.006	АДНП-100	95—115	2,5

В 2007—2009 гг. в УДНП были внесены конструктивные изменения: создана новая измерительная камера, сокращено количество испытываемой жидкости и полностью обновлена пневматическая система. Усовершенствованный измерительный комплекс сохранил свои метрологические характеристики. В настоящее время он находится во ВНИИМ и существует в единственном экземпляре, не имея аналогов ни в России, ни в мире. Устройство способно реализовать современные методы измерений ДНП жидкостей. Также разработана система автоматической подачи образцов исследуемых жидкостей в измерительную камеру, построен алгоритм работы её клапанов и системы слива отработанной жидкости. Планируется доработать установку так, чтобы минимизировать участие оператора в процессе измерений, что позволит снизить вероятность случайных ошибок. В результате число автоматических операций возрастёт, производительность установки повысится. Также снизится трудоёмкость процесса измерений, ускорится процесс получения результатов, так как будет обеспечена их визуализация с последующим выводом на печать. Кроме того, замена датчиков давления и температуры улучшит метрологические характеристики установки.

Проблема повышения производительности работы УДНП приобретает всё большее значение. Это обусловлено внесением в Государственный реестр России нескольких новых анализаторов нефтепродуктов, таких как ERAVAP, RVP-4, а также MINIVAP LPG, MINIVAP Xpert и MINIVAP VPXpert, запланировано утверждение типа еще двух приборов. Таким образом, тенденция увеличения количества анализаторов на территории России сохраняется.

В 2007 г. совместно со специалистами НПП «Парк-Центр» были начаты работы по созданию поточной установки для измерений ДНП нефти в нефтяных магистралях на базе УДНП. В 2010 г. был создан опытный образец автоматической установки, получивший название АУИДНП, а еще через год был разработан опытный образец. На данный момент проект приостановлен на стадии испытаний с целью утверждения типа СИ [18].

С увеличением точности УДНП возрастёт возможность испытаний и поверки как новых анализаторов, так и аттестации новых СО ДНП, а с ростом производительности повысится обслуживание большего числа анализаторов в год, что в значительной степени увеличит экономический эффект от автоматизации устройств. Серийный выпуск подобных стационарных, мобильных и поточных установок позволит российскому потребителю приобрести прибор уровня лучших зарубежных анализаторов, сравнительно недорогой и, что самое ценное в период перехода России к импортозамещению, — отечественного производства.

В 2015 г. была проведена большая работа по подготовке УДНП к утверждению в статусе рабочего эталона. На момент написания статьи документы находятся на утверждении в Росстандарте. Утверждение УДНП в качестве рабочего эталона выведет метрологическое обеспечение в области измерений ДНП в России на новый этап развития.

Литература

1. **ГОСТ 1756—2000.** Нефтепродукты. Определение давления насыщенных паров.
2. **Горобей В. Н., Захаренко Ю. Г., Марусина М. Я., Снегов В. С.** Государственные первичные эталоны единиц физических величин. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011.
3. **Марусина М. Я., Базаров Б. А., Марусин М. П., Галайдин П. А., Силаев А. А., Закемовская Е. Ю., Гилев А. Г., Алексеев А. В.** Магнитная система на основе постоянных магнитов для расходомера многофазных текучих сред // Измерительная техника. 2014. № 4. С. 62—65.
4. **Марусина М. Я., Базаров Б. А., Марусин М. П., Галайдин П. А., Силаев А. А., Закемовская Е. Ю., Мустафаев Ю. Н.** Синтез градиентной системы мультифазного расходомера // Измерительная техника. 2014. № 5. С. 68—72.
5. **ИСО 3007—71.** Нефть и нефтепродукты. Определение давления насыщенных паров.
6. **Горобей В. Н., Крутовских М. П., Витковский О. С.** Методы и средства измерений давления насыщенных паров нефтепродуктов // Измерительная техника. 2006. № 3. С. 42—45.
7. **Витковский О. С., Николаева Н. Р.** Анализаторы давления насыщенных паров нефтепродуктов // Приборы и средства автоматизации. 2010. № 8. С. 45—49.
8. **ASTM D6377.** Стандартный метод определения давления паров сырой нефти: показателя VPCR_x (метод расширения).
9. **ASTM D6378.** Стандартный метод определения давления паров (VPX) нефтепродуктов, углеводородов и углеводород-оксигенатных смесей (метод трехкратного расширения).
10. **EN ISO 13016-1—2001.** Жидкие нефтепродукты. Определение давления насыщенных паров. Ч. 1: Определение давления насыщенных воздухом паров (ASVP).
11. **ASTM D323.** Standard Test Method for Vapor Pressure of Petroleum Products (Reid Method).
12. **ASTM D4953.** Standard Test Method for Vapor Pressure of Gasoline and Gasoline-Oxygenate Blends (Dry Method).
13. **ASTM D6378.** Standard Test Method for Determination of Vapor Pressure (VPX) of Petroleum Products, Hydrocarbons, and Hydrocarbon-Oxygenate Mixtures (Triple Expansion Method).
14. **ASTM D5191.** Standard Test Method for Vapor Pressure of Petroleum Products (Mini Method).
15. **ГОСТ 9965—76.** Нефть для нефтеперерабатывающих предприятий. Технические условия.
16. **Эталонные материалы.** Каталог ВНИИМ им Д. И. Менделеева. СПб., 2014.
17. **Горобей В. Н., Крутовских М. П., Витковский О. С.** Исследование стандартных образцов жидкостей АДНП на установке для измерения давления насыщенных паров нефтепродуктов // Тез. докл. 10-го Межд. науч.-техн. семинара «Разработка, производство, применение и метрологическое обеспечение средств измерения давления и вакуума». СПб. 2006. С. 181—183.
18. **Заславский Л. С., Рыжик В. Ю., Витковский О. С., Саввин А. В., Слабнов А. А.** Автоматизация процесса измерения давления насыщенных паров нефтепродуктов // Приборы и средства автоматизации. 2010. № 6. С. 6—9.

Дата принятия 23.12.2015 г.