

**Для цитирования:** Сагдеев Д.И., Абдулагатов И.М., Никулин Н.К., Тюлькин В.И. Модернизированная конструкция гидростатического плотномера для измерения плотности высоковязких нефтей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(4): 42-52. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-42-52

**For citation:** D.I. Sagdeev, I.M. Abdulagatov, N.K. Nikulin, V.I. Tyulkin. Modernised design of a hydrostatic densimeter for measuring density of highly viscous oils. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(4): 42-52. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-42-52

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 532.14:678

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-42-52

### МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ПЛОТНОМЕРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ

Сагдеев Д.И.<sup>1</sup>, Абдулагатов И.М.<sup>2</sup>, Никулин Н.К.<sup>3</sup>, Тюлькин В.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет,

<sup>1</sup>1420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, Россия,

<sup>2</sup>Дагестанский государственный университет,

<sup>2</sup>367000, г. Махачкала, ул. Гаджиева, д. 43-а, Россия,

<sup>3</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

<sup>3</sup>105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Россия

**Резюме. Цель.** Целью данной работы является модернизация плотномера ВТ-КХТИ, работающего по методу гидростатического взвешивания, для исследования плотности высоковязких нефтей и нефтепродуктов в интервале изменения температур от 293 К до 473 К при атмосферном давлении. **Метод.** Из многочисленных методов исследования плотности в ходе исследования применены: пьезометры постоянного и переменного объемов, метод гидростатического взвешивания. **Результат.** Представлены результаты исследования плотности высоковязких нефтей Республики Татарстан в интервале изменения температур от 293 К до 473 К при атмосферном давлении следующих марок: Ашальчинская нефть (сверхвязкая, СВН); Куакбаишская нефть (сернистая), Кичуйская нефть и Девонская нефть. Произведен анализ и выбор методик измерения плотности. Приведена методика оценки погрешности и калибровки плотномера. Рассмотрена модернизированная конструкция гидростатического плотномера для измерения плотности высоковязких нефтей. Выполнен вывод расчетного выражения для метода гидростатического взвешивания. **Вывод.** Плотномер ВТ-КХТИ для вакуумных рабочих жидкостей модернизирован и откалиброван для научно-исследовательских работ по измерению коэффициента динамической вязкости реовискозиметром ВТ-КХТИ, как ньютоновских, так и неньютоновских жидкостей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №18-19-00478).

**Ключевые слова:** плотность, нефть, гидростатический плотномер, методы измерения плотности, метод гидростатического взвешивания

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

MODERNISED DESIGN OF A HYDROSTATIC DENSIMETER FOR MEASURING DENSITY OF HIGHLY VISCOUS OILS

*D.I. Sagdeev<sup>1</sup>, I.M. Abdulagatov<sup>2</sup>, N.K. Nikulin<sup>3</sup>, V.I. Tyulkin<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Kazan National Research Technological University,

<sup>1</sup>68 Karl Marx St., Kazan 1420015, Russia,

<sup>2</sup>Daghestan State University,

<sup>2</sup>43-a Gadzhieva St., Makhachkala 367000, Russia,

<sup>3</sup>Bauman Moscow State Technical University,

<sup>3</sup>5 Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia

**Abstract. Objectives.** The aim of this work is to modernise a VT-KHTI densimeter operated by the method of hydrostatic weighing in order to study the density of highly viscous oils and oil products in the temperature range from 293 K to 473 K at atmospheric pressure. **Method.** Among the many methods for studying density, the following were used in the course of the study: the constant- and variable-volume piezometer method and the method of hydrostatic weighing. **Results.** The results of the densimetric study of highly viscous oils obtained from the Republic of Tatarstan in the temperature range from 293 K to 473 K at atmospheric pressure. The following grades are presented: Ashalchinskaya oil (super-viscous, SVO); Kuakbash oil (sulphur), Kichuy oil and Devon oil. Following an analysis and selection of methods for measuring density, a technique for error estimation and densimeter calibration is presented. A calculated expression for the hydrostatic weighing method, derived from the modernised hydrostatic densimeter design for measuring the density of highly viscous oils, is presented. **Conclusion.** The VT-KHTI densimeter for vacuum working fluids has been modernised and calibrated for research work on measuring the dynamic viscosity coefficient of both Newtonian and non-Newtonian liquids.

**Acknowledgments** The study was carried out with a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 18-19-00478).

**Keywords:** density, oil, hydrostatic densimeter, density measurement methods, hydrostatic weighing method

**Введение.** Плотность, наряду с другими коэффициентами (вязкости, диффузии и теплопроводности) явлений переноса, является важнейшей структурно-механической характеристикой материала, определяющей его технологические, эксплуатационные и потребительские свойства. Плотность является практически важной теплофизической характеристикой свойств в технологических процессах при нефтедобыче, в нефтехимии, биохимии, пищевой, косметической, лакокрасочной и других отраслях промышленности. Плотность как важная расчетная величина необходима для теоретических расчетов, включая околокритическую область [1,2].

**Постановка задачи.** Неудовлетворительное состояние отечественного приборостроения и фантастические цены на высокоточное зарубежное оборудование, недоступные даже для промышленных предприятий, вынуждают ученых заниматься вопросами импортозамещения, разрабатывать и изготавливать необходимые для научной работы приборы и экспериментальные установки по исследованию плотности высоковязких нефтей и других жидкостей в различных отраслях промышленности [3,4].

Целью данной работы является модернизация плотномера VT-KХТИ, работающего по методу гидростатического взвешивания, для исследования плотности высоковязких нефтей и нефтепродуктов в интервале изменения температур от 293 К до 473 К при атмосферном давлении.

**Методы исследования.** Из многочисленных методов исследования плотности [5] наиболее разработанными являются: пьезометры постоянного и переменного объемов, метод гидро-

статического взвешивания. Приведем краткое описание с последующим выбором метода гидростатического взвешивания

Пьезометр постоянного объема. Различают пьезометры разгруженные [6] и не разгруженные от давления [7]. Наиболее простым в изготовлении является неразгруженный пьезометр с балластным капилляром, позволяющий получить данные с погрешностью  $\pm 0,15\%$ .

Погрешность метода обусловлена наличием балластного объема и возможными изменениями давления при отсечении измеряемого объема конусами запорных вентилей. При отборе пробы происходит разгерметизация системы, что затрудняет работу с гигроскопичными жидкостями.

Пьезометр переменного объема. Наиболее простым для определения  $p-v-T$  данных является метод, основанный на перемещении поршня [8]. Применение этого метода не исключает возможности утечек через неплотности и не обеспечивает сохранность чистоты исследуемых веществ. Другой метод - сильфонного пьезометра, предложенный Бриджменом [9], получил усовершенствование в работах [10-12] и успешно реализован при давлениях до 1000 МПа.

Сильфон, заполненный жидкостью, подвергается гидростатическому давлению. Изменение внутреннего объема определяется по изменению высоты сильфона. К преимуществам этого способа следует отнести высокую - до 0,1% - точность измерения сжимаемости жидкостей. Метод имеет ряд ограничений: он не позволяет работать с вязкими жидкостями ( $\eta > 100$  мПа·с) в области низких температур, требует соблюдения предосторожностей, исключающих деформацию сильфона.

Метод гидростатического взвешивания. Плотномеры различаются главным образом устройством для взвешивания поплавка. Гидростатические [13] и тензометрические [14] весы позволяют производить измерения плотности в широкой области изменения параметров состояния. Но реализация метода требует вывода из зоны высоких давлений большого количества измерительных проводов, что значительно усложняет конструкции установок.

В настоящее время получил применение метод гидростатического взвешивания, разработанный и усовершенствованный И.Ф.Голубевым [15,16]. Характерной особенностью метода является электромагнитное центрирование подвесной системы, исключающее ее контакт со стенками сосуда высокого давления. Устройства с магнитной подвеской обладают высокой разрешающей способностью [17,18] и позволяют определять плотность жидкостей с погрешностью  $\pm 0,01\%$ .

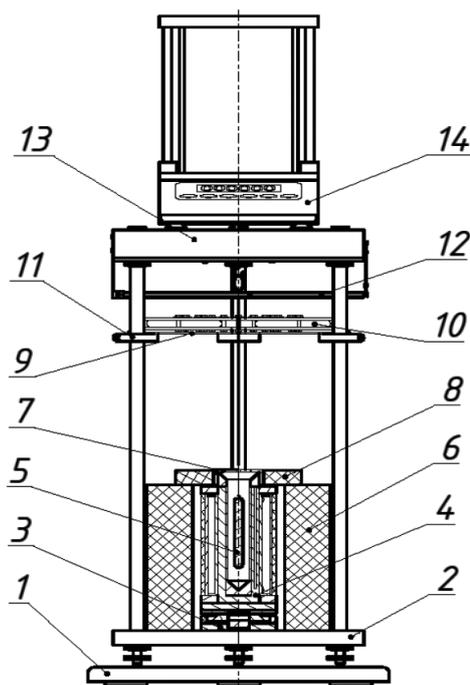
В работе [19] приведено описание совмещенной экспериментальной установки, реализующей методы падающего груза и гидростатического взвешивания, предназначенной для измерения коэффициентов динамической вязкости и плотности жидкостей в диапазоне изменения температур от 293 К до 473 К и давлений от 0,098 МПа до 250 МПа.

Экспериментальная часть. Модернизирован и откалиброван плотномер ВТ-КХТИ [20], работающий по методу гидростатического взвешивания, на базе электронных весов неавтоматического действия «HR-250AZG» японской фирмы «A&D Co. LTD», оснащенных встроенной гирей, позволяющей производить калибровку одним нажатием клавиши.

Данная усовершенствованная конструкция гидростатического плотномера позволяет производить измерение плотности жидкостей в интервале изменения температур от 293 К до 473 К при атмосферном давлении с минимальным временем эксперимента.

Общий вид гидростатического плотномера представлен на рис.1.

На массивном поддоне (1) располагается штатив (2) с регулируемыми ножками, на котором установлена центрирующая система (3), позволяющая перемещать термостатирующую систему (4) в горизонтальной плоскости. На столе (13), снабженном тремя стойками с тремя опорными кольцами (11) для фиксации экрана от тепловых потоков (9), расположен холодильник – экран, предохраняющий электронные весы (14) от тепловых потоков. К нижнему крючку весов подвешивается система измерения плотности (5), состоящая из кольца, нити и поплавок из титанового сплава марки ВТ-6. Размеры поплавка: диаметр - 10 мм, длина - 100 мм.



**Рис. 1. Общий вид плотномера VT-KHTI**

1 – поддон; 2 – штатив; 3 – центрирующая система; 4 – термостатирующая система; 5 – система измерения – кольцо, нить и поплавок из титанового сплава марки VT-6; 6 – кожух асбестовый; 7 – стакан с воронкой; 8 – кольцевые асбестовые диски; 9 – текстолитовый опорный диск; 10 – холодильник-экран от тепловых потоков на веса; 11 – опорное кольцо; 12 – система настройки на «ноль» электронных весов; 13 – стол; 14 – электронные весы марки «HR-250AZG» японской фирмы «A&D Co. LTD»

**Fig. 1. General view of the density meter VT-KHTI**

1 - pallet; 2 - tripod; 3 - centering system; 4 - thermostatic system; 5 - measurement system - ring, thread and float from titanium alloy grade VT-6; 6 - casing asbestos; 7 - a glass with a funnel; 8 - ring asbestos disks; 9 - textolite support disk; 10 - refrigerator screen from heat flows to the scales; 11 - a basic ring; 12 - system settings for "zero" electronic scales; 13 - table; 14 - electronic scales of the HR-250AZG brand of the Japanese company A&D Co. LTD»

В верхней части поплавков имеет ушко для подвешивания на предварительно отожженной константановой проволоке диаметром 0,15 мм и длиной 300 мм. Проволока подвешивается к крючку электронных весов марки «HR-250AZG» через переходник, который в свою очередь соединяется с системой настройки на «ноль» электронных весов (12).

Данная система представляет собой пластину, по центру которой просверлено отверстие диаметром 10 мм. Кольцо, диаметром 25 мм, расположенное выше и соединенное константановой нитью с титановым поплавком, выходит из зацепления при подъеме пластины, а это позволяет настроить на «ноль» электронные весы.

Поплавок помещается в стакане (7) с внутренним диаметром 25 мм с воронкой в верхней части, для исключения перелива исследуемой жидкости. Стакан вставляется в медный блок, помещаемый в теплообменник, через каналы которого прокачивается термостатирующая жидкость. Теплообменник покрыт асбестовой теплоизоляцией. Для предохранения от тепловых потерь предусмотрен кожух асбестовый (6) с боков и два полукольцевых асбестовых диска (8).

Термостатирование осуществлялось полиметилсилаксановой жидкостью марки ПМС-20, которая поступала из циркуляционного термостата LOIP LT-211 с точностью поддержания температуры  $\pm 0,1$  К. Для контроля температуры в медном блоке при проведении эксперимента были использованы медь-константановые термопары, помещенные в отверстие в медном блоке термостатирующей системы. Холодные спаи термопар помещались в сосуд Дьюара, заполненный смесью дистиллированной воды со льдом.

Градуировка температуры внутри автоклава и термопар проводилась по термометру лабораторному электронному ЛТ-300, который для диапазона измеряемых температур от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $200^{\circ}\text{C}$  имеет допускаемую абсолютную погрешность измерения температуры  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ .

Оценка погрешности результатов аппроксимации результатов измерения температуры внутри измерительного стакана можно описать уравнением

$$t_a = 1,43500 + 8,94654 \cdot 10^{-1} \cdot t_t + 2,14324 \cdot 10^{-4} \cdot t_t^2, \quad (1)$$

где  $t_a$  – температура внутри измерительного стакана;  $t_t$  – температура циркуляционного термостата LOIP LT-211. Абсолютная погрешность температуры внутри измерительного стакана оценивается  $\pm 0,42$  °С.

Результаты измерений температуры термометром лабораторным электронным ЛТ-300 выводятся на цифровой жидкокристаллический индикатор. Термометр также может быть подключен к компьютеру через интерфейс.

Вывод расчетного выражения для метода гидростатического взвешивания. Вывод расчетного выражения для метода гидростатического взвешивания проведем по ранее использованной нами методике для измерения плотности жидкостей [19,21–24].

Взвешивание на электронных весах имеет свои особенности, так как исключает перемещение подвесной системы, состоящей из кольца, нити и поплавка, по вертикали, как в рычажных или пружинных весах. Процесс достижения равновесия подвесной системы в процессе взвешивания в нашем случае зависит от характеристики электронных весов неавтоматического действия «HR-250AZG» японской фирмы «A&D Co. LTD», которые оснащены встроенной гирей, позволяющей производить калибровку одним нажатием клавиши.

Подвесная система плотномера состоит из кольца, нити и поплавка. На нее действует сила реакции со стороны подвеса электронных весов ( $P$ ), которая численно равна разности веса подвесной системы, приведенной к пустоте, и массы подвесной системы при взвешивании в воздухе и направлена вниз

$$P = (m - m_1) \cdot g, \quad (2)$$

где  $m = m_{\text{п}} + m_{\text{н}} + m_{\text{к}}$  – сумма масс, приведенных к пустоте, поплавок, нити и кольца, соответственно;  $m_1 = m_{1\text{п}} + m_{1\text{н}} + m_{1\text{к}}$  – сумма масс поплавок, нити и кольца, соответственно, взвешенных при проведении эксперимента по определению плотности исследуемой жидкости.

Рассмотрим вопросы определения объема и массы подвесной системы, приведенной к пустоте, по рекомендации изложенной в литературе [25].

Расчет объема, приведенного к пустоте (в вакууме) для рычажных весов

$$V = \frac{m_{\text{в}} - m_{\text{ж}} - (m_{\text{в}} - m_{\text{ж}}) \cdot \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{г}}}}{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{в}}}, \quad (3)$$

для электронных весов, в которых отсутствует разновес

$$V = \frac{m_{\text{в}} - m_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{в}}}, \quad (4)$$

где  $m_{\text{в}}$  – масса гирь при взвешивании поплавок, нити и кольца, соответственно, в воздухе при температуре  $t = 20$  °С;

$m_{\text{ж}}$  – масса гирь при взвешивании поплавок, нити и кольца, соответственно, в дистиллированной воде при температуре  $t = 20$  °С;

$V$  – объем подвесной системы, приведенный к пустоте (в вакууме)

$\rho_{\text{в}} = 1,2$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха при температуре  $t = 20$  °С;

$\rho_{\text{ж}} = 998,23$  кг/м<sup>3</sup> – плотность дистиллированной воды при температуре  $t = 20$  °С;

$\rho_{\text{г}} = 8000$  кг/м<sup>3</sup> – плотность гирь разновеса при температуре  $t = 20$  °С.

Расчет массы, приведенной к пустоте (в вакууме) для рычажных весов

$$m = m_B - \left( \frac{m_B}{\rho_{\Gamma}} - V \right) \cdot \rho_B, \quad (5)$$

для электронных весов, в которых отсутствует разновес

$$m = m_B + V \cdot \rho_B, \quad (6)$$

где  $m$  – масса подвесной системы, приведенная к пустоте (в вакууме).

Подвесная система плотномера уравнивается Архимедовой силой, направленной вверх и состоящей из суммы выталкивающих сил, действующих на поплавок, нить и кольцо со стороны воздуха и исследуемой жидкости

$$F_A = (V_{\Pi} \cdot \rho_{\text{ж}} + 0,1 \cdot V_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{ж}} + 0,9 \cdot V_{\text{н}} \cdot \rho_B + V_{\text{к}} \cdot \rho_B) \cdot g, \quad (7)$$

где  $V_{\Pi}$  – объем титанового поплавка;  $V_{\text{н}}$  – объем константановой нити;  $V_{\text{к}}$  – объем алюминиевого кольца;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность исследуемой жидкости;  $\rho_B = 1,2 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха. В нашем случае в исследуемой жидкости полностью погружен поплавок ( $V_{\Pi}$ ) и десятая часть нити длиной 20 мм ( $0,1 \cdot V_{\text{н}}$ ), а в воздухе находится кольцо ( $V_{\text{к}}$ ) и девять десятых нити ( $0,9 \cdot V_{\text{н}}$ ). Длину проволоки рассчитывают так, чтобы в исследуемую жидкость погрузилась лишь небольшая ее часть (около 20 мм), при этом уменьшение веса проволоки в жидкости сведется к минимуму [3].

Запишем уравнение баланса сил гидростатического плотномера

$$P = F_A. \quad (8)$$

Запишем выражение (7) с использованием выражений (2) и (7)

$$(m - m_1) \cdot g = (V_{\Pi} \cdot \rho_{\text{ж}} + 0,1 \cdot V_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{ж}} + 0,9 \cdot V_{\text{н}} \cdot \rho_B + V_{\text{к}} \cdot \rho_B) \cdot g. \quad (9)$$

Проведем преобразование (9) и получим

$$m - m_1 = V_{\Pi} \cdot \rho_{\text{ж}} + 0,1 \cdot V_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{ж}} + 0,9 \cdot V_{\text{н}} \cdot \rho_B + V_{\text{к}} \cdot \rho_B, \quad (10)$$

$$m - m_1 - \rho_B \cdot (0,9 \cdot V_{\text{н}} + V_{\text{к}}) = \rho_{\text{ж}} \cdot (V_{\Pi} + 0,1 \cdot V_{\text{н}}). \quad (11)$$

Выразим плотность исследуемой жидкости  $\rho_{\text{ж}}$  из (11) и получим

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{m - m_1 - \rho_B \cdot (0,9 \cdot V_{\text{н}} + V_{\text{к}})}{(V_{\Pi} + 0,1 \cdot V_{\text{н}})}. \quad (12)$$

Для удаления большой систематической ошибки из окончательного результата для вычисления плотности исследуемой жидкости  $\rho_{\text{ж}}$  проведем калибровку объема поплавка  $V_{\Pi}^{\text{к}}$  из выражения (10) при плотности исследуемой жидкости  $\rho_{\text{ж}}^*$ , полученной методом пикнометра при температуре  $20^{\circ}\text{C}$

$$V_{\Pi}^{\text{к}} = \frac{(m - m_1^{\text{к}} - V_{\text{к}} \cdot \rho_B - V_{\text{н}} \cdot (\rho_{\text{ж}}^* \cdot 0,1 + \rho_B \cdot 0,9))}{\rho_{\text{ж}}^*}. \quad (13)$$

В выражении (13)  $m_1^{\text{к}}$  – сумма масс поплавка, нити и кольца, взвешенных при калибровке объема поплавка при калибровке объема поплавка.

Окончательно можно записать выражение для вычисления плотности исследуемой жидкости  $\rho_{\text{ж}}$

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{m - m_1 - \rho_B \cdot (0,9 \cdot V_{\text{н}} + V_{\text{к}})}{(V_{\Pi}^{\text{к}} + 0,1 \cdot V_{\text{н}})}. \quad (14)$$

Влияние температуры в основном осуществляется на титановый поплавок, которое можно выразить следующим выражением

$$V_t = V_{\Pi}^{\text{к}} \cdot \Delta_t = V_{\Pi}^{\text{к}} \cdot [1 + 3 \cdot \alpha_t \cdot 10^{-6}], \quad (15)$$

где  $V_t$  – объем титанового поплавка при температуре опыта.

Поправка на изменение объема поплавка от температуры, который изготовлен из титанового сплава марки ВТ-6

$$\Delta_t = [1 + 3 \cdot \alpha_t \cdot 10^{-6}], \quad (16)$$

где  $\alpha_t = 7,70932 + 0,00382203 \cdot t$  – коэффициент линейного расширения материала поплавка  $t$  – температура опыта, °C,  $\alpha_{t=20^\circ\text{C}} = 7,78576 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}}$  – при температуре калибровки  $t_{20} = 20^\circ\text{C}$ .

Влиянием температуры на 0,1 длины константановой нити можем пренебречь.

Окончательно можно записать выражение для вычисления плотности исследуемой жидкости  $\rho_{ж_t}$  при различных температурах

$$\rho_{ж_t} = \frac{m - m_1 - \rho_B \cdot (0,9 \cdot V_H + V_K)}{(V_t + 0,1 \cdot V_H)}. \quad (17)$$

Контрольные измерения плотности методом гидростатического взвешивания. На экспериментальной установке [20] были проведены контрольные исследования плотности н-гептана ( $C_7H_{16}$ ) эталонного ГОСТ 25828-83 фирмы «Компонент-Реактив» ( $\rho_4^{20} = 683,67$  кг/м<sup>3</sup>,  $n_D^{20} = 1,3878$ ) при температурах от 293 К до 323 К при атмосферном давлении.

Экспериментальные данные при атмосферном давлении были получены двумя методами: пикнометрическим [3] и методом гидростатического взвешивания. Согласование результатов измерений плотности, полученных указанными выше независимыми методами, хорошее совпадение с литературными данными [22,23] подтверждают достоверность проведенных экспериментальных исследований. Максимальные расхождения не превышают  $\pm 0,3\%$ , что лежит в пределах расчетной погрешности опыта.

Результаты по оценке погрешности, представленные в [20] позволяют сделать вывод, что расчетная погрешность эксперимента при исследовании н-гептана плотности методом гидростатического взвешивания  $\pm 0,0216\%$ .

Для проверки работоспособности гидростатического плотномера ВТ-КХТИ в области высоких температур была проведена калибровка по ранее изученным нами жидкостям с температурами кипения моноэтиленгликоль (МЭГ) [19,21] –  $197,3^\circ\text{C}$  (470,45К) и монопропиленгликоль (МПГ) [24] –  $187,4^\circ\text{C}$  (460,55К). Данная калибровка показала хорошее согласие экспериментальных данных при высоких температурах.

Оценка погрешности опытов. Оценка погрешности измерения  $\rho_T$  для олеиновой кислоты на данной установке была проведена в соответствии с ГОСТ 8.207-76 [26] для прямых измерений и косвенных ГОСТ МИ 2083-90 ГСИ [27] в условиях многократных наблюдений, полученных для неблагоприятных условий проведения эксперимента, и руководству по выражению неопределенности в измерениях [28].

Результаты по оценке погрешности позволяют сделать вывод, что расчетная погрешность эксперимента при исследовании плотности олеиновой кислоты методом гидростатического взвешивания при доверительной вероятности  $P_{\text{дов}} = 0,95$  составляет  $\Delta = \pm 0,014\%$  [29].

**Обсуждение результатов.** На экспериментальной установке были проведены исследования плотности нефтей Республики Татарстан в интервале изменения температур от 293 К до 473 К при атмосферном давлении следующих марок: Ашальчинская нефть (сверхвязкая, СВН); Куакбашская нефть (сернистая), Кичуйская нефть и Девонская нефть. Результаты измерений плотности нефтей при различных температурах были обработаны полиномами второй степени (18), коэффициенты которых приведены в табл. 1

$$\rho(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2, \quad (18)$$

где  $\rho(T)$  – плотность [кг/м<sup>3</sup>];  $T$  – температура в градусах [K].

**Таблица 1. Коэффициенты полинома второй степени для выражения (18)**  
**Table 1. Coefficients of a polynomial of the second degree for expression (18)**

№	Наименование Name	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$R^2$
1	Ашальчинская нефть (сверхвязкая, СВН) Ashalchinskaya oil (super-viscous, extra-viscous oil)	$1,16435 \cdot 10^3$	$7,78761 \cdot 10^{-1}$	$2,24214 \cdot 10^{-4}$	$9,99903 \cdot 10^{-1}$
2	Куакбашская нефть (сернистая) Kuakbash oil (sulphurous)	$1,27230 \cdot 10^3$	-1,76031	$1,67805 \cdot 10^{-3}$	$9,99074 \cdot 10^{-1}$
3	Кичуйская нефть Kichuy oil	$1,15078 \cdot 10^3$	-1,32429	$1,18204 \cdot 10^{-3}$	$9,91618 \cdot 10^{-1}$
4	Девонская нефть Devonian oil	$1,17054 \cdot 10^3$	-1,35848	$1,24558 \cdot 10^{-3}$	$9,94556 \cdot 10^{-1}$

Расхождения в среднем не превышают  $\pm 0,5\%$ , что лежит в пределах суммарной ошибки измерений.

**Вывод.** Проведены измерения плотности четырех образцов высоковязких нефтей Республики Татарстан. Плотномер ВТ-КХТИ для вакуумных рабочих жидкостей модернизирован и откалиброван для научно-исследовательских работ по измерению коэффициента динамической вязкости реовискозиметром ВТ-КХТИ как ньютоновских, так и неньютоновских жидкостей.

#### Библиографический список:

- Сагдеев Д.И., Фомина М.Г., Мухамедзянов Г.Х. Обобщенное уравнение для плотности жидкостей на псевдокритической изобаре. Вестник Казанского технологического университета, 2010, №2, С. 233-237.
- Сагдеев Д.И., Фомина М.Г., Воробьев Е.С., Мухамедзянов Г.Х., Абдулагатов И.М. Модифицированное уравнение состояния смесей моно, ди- и триэтиленгликолей с учетом их состава. Вестник Казанского технологического университета, 2014, Т.17, вып. 19, С. 233-237.
- Кивилис С.С. Плотномеры. – М.: Энергия, 1980. – 280 с.
- Измерение массы, объема и плотности. Гаузнер С.И., Кивилис С.С., Осокина А.П., Павловский А.Н. М., Издательство стандартов, 1972, – 624 с.
- Парфенов В.И. Классификация методов измерения плотности жидкостей. – Приборы и системы управления, 1977, №5, С.38-39.
- Порхун А.И., Цатурянц А.Б., Порхун Л.Д. Учет деформаций для исследования р-V-T свойств жидкостей и газов. – ПТЭ, 1976, №5, с.253-256.
- Порхун А.И., Болотин Н.К. Экспериментальная установка для исследования плотности легких углеводородов при низких температурах и давлениях до 1000 бар. – В кн.: Теплофизические свойства углеводородов, их смесей, нефтей и нефтяных фракций. М., 1973, вып. 1, с.181-186.
- Doollittle A.K. Specific volumes of n-alkanes. – J.Chem. and Eng. Data, 1964, v. 9, №2, p.275-279.
- Бриджмен П. В. Физика высоких давлений. – Л.-М.: ГОНТИНКТП-СССР, 1935. – 404 с.
- Циклис Д.С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях. – М.: Химия, 1965. – 416 с.
- Атанов Ю.А., Борзунов В.А., Разумихин В.Н. Измерение сжимаемости жидкостей методом сильфонного пьезометра при давлениях до 10000 кгс/см<sup>2</sup>. – Труды/ВНИИФТРИ, 1964, вып. 75 (135), с.143-150.
- Шаховский Г.П., Лавров И.А., Пушкинский М.Д., Гоникберг М.Г. Установка для определения сжимаемости жидкостей. – ПТЭ, 1962, №1, с.181-183.
- Борзунов В.А., Разумихин В.Н. Установка для измерения плотности жидкостей гидростатическим методом при давлениях до 10000 кгс/см. - Труды/ВНИИФТРИ. 1964, вып.75 (135), с.134-142.
- Павлович Н.В., Тимрот Д.Л. Экспериментальное исследование зависимости р-V-T газообразного и жидкого метана. – Теплоэнергетика, 1958, № 4, с.69-75.

15. Голубев И.Ф. Определение удельного веса жидкостей и газов при высоких давлениях методом гидростатического взвешивания. – Труды/ГИАП, 1957, вып.7, с.47-61.
16. Голубев И.Ф., Добровольский О.А. Измерение плотности азота и водорода при низких температурах и высоких давлениях методом гидростатического взвешивания. – Газовая промышленность, 1964, № 5, с.43-47.
17. Кацнельсон О.Г., Эдельштейн А.С. Автоматические измерительные приборы с магнитной подвеской. – М.: Энергия, 1970. – 216 с.
18. Восканян Р.О., Крайнов В. П., Воробьев А.Н., Никитский В.Б. Установка для измерения веса тела, находящегося в замкнутом сосуде. – Зав.лаборатория, 1976, т.42, № 3, с.310-311.
19. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Mukhamedzyanov G. Kh., Abdulagatov I.M. Experimental study of the density and viscosity of polyethylene glycols and their mixtures at temperatures from 293 K to 473 K and at atmospheric pressure. J. Chem. Thermodynamics, 2011, v.43, №12, p.1824-1843.
20. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Alyev V.A., Musin R.Z., Abdulagatov I.M. Density of working liquids for diffusion vacuum pumps. J. Chem. Eng. Data, 2018, v.63, p. 1698-1705.
21. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Abdulagatov I.M. Viscosity and density of polyethylene glycols and their mixtures. LAP LAMBERT, Academic Publishing, 2017. - 146 p.
22. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Mukhamedzyanov G. Kh., Abdulagatov I.M. Experimental study of the density and viscosity of n-heptane at temperatures from 298 K to 470 K and pressure up to 245 MPa. Int. J. Thermophys., 2013, v.34, №1, p.1-33.
23. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Abdulagatov I.M. Viscosity and density of n-heptane at high temperatures and pressures. LAP LAMBERT, Academic Publishing, 2017. - 91 p.
24. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Abdulagatov I.M. Density and viscosity of propylene glycol at high temperatures and high pressures. Fluid Phase Equilibria, 2017, т. 450, с.99-111.
25. Турубинер И.К., Иппиц М.Д. Техника измерения плотности. М.: Машгиз, 1949, 127 с.
26. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. – Введ. с 01.01.77. – 10 с.
27. ГОСТ МИ 2083-90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. – Введ. с 01.01.92. – 10 с.
28. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement; ISO: Geneva, Switzerland, 1993, (ISBN 92-67-10188-9)
29. D.I. Sagdeev, I.R. Gabitov, Ch.Kh. Isyanov, V.F. Khairutdinov, M.I. Farakhov, Z.I. Zaripov, I.M. Abdulagatov. Temperature Effect on Density and Viscosity of Oleic Acid. J Am Oil Chem Soc., 2019, v.96, pp.647-662.

#### References:

1. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Mukhamedzyanov G.H. Obobshchennoye uravneniye dlya plotnosti zhidkostey na psevdokriticheskoj izobare. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, 2010, №2, P. 233-237. [Sagdeev D.I., Fomina M.G., Mukhamedzyanov G.Kh. A generalized equation for the density of liquids on a pseudocritical isobar. Bulletin of Kazan Technological University, 2010, No. 2, pp. 233-237. (In Russ)]
2. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Vorob'yev Y.S., Mukhamedzyanov G.H., Abdulagatov I.M. Modifitsirovannoye uravneniye sostoyaniya smesey mono, di- i trietilenglikoley s uchetom ih sostava. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, 2014, Vol.17, v. 19, pp. 233-237. [Sagdeev D.I., Fomina M.G., Vorobev E.S., Mukhamedzyanov G.Kh., Abdulagatov I.M. The modified equation of state of mixtures of mono, di - and triethylene glycols, taking into account their composition. Bulletin of Kazan Technological University, 2014, Vol. 17, No. 19, pp 233-237. (In Russ)]
3. Kivilis S.S. Plotnometry. M.: Energiya, 1980. 280 p. [Kivilis S.S. Density meters. - M.: Energy, 1980. -- 280 p. (In Russ)]
4. Izmereniye massy, obyema i plotnosti. Gauzner S.I., Kivilis S.S., Osokina A.P., Pavlovskiy A.N. M., Izdatel'stvo standartov, 1972, 624 p. [Measurement of mass, volume and density. Gauzner S.I., Kivilis S.S., Osokina A.P., Pavlovsky A.N. M., Publishing house of standards, 1972. 624 p. (In Russ)]
5. Parfenov V.I. Klassifikatsiya metodov izmereniya plotnosti zhidkostey. – Pribory i sistemy upravleniya, 1977, No. 5, pp.38-39. [Parfenov V.I. Classification of methods for measuring the density of liquids. - Devices and control systems, 1977, No. 5, pp.38-39. (In Russ)]
6. Porkhun A.I., Tsaturyants A.B., Porkhun L.D. Uchet deformatsiy dlya issledovaniya r-V-T svoystv zhidkostey i gazov. – PTE, 1976, №5, p.253-256. [Porkhun A.I., Tsaturyants A.B., Porkhun L.D. Deformation accounting for the study of p-V-T properties of liquids and gases. - PTE, 1976, No. 5, pp. 253-256. (In Russ)]
7. Porkhun A.I., Bolotin N.K. Eksperimentalnaya ustanovka dlya issledovaniya plotnosti legkikh uglevodorodov pri nizkikh temperaturakh i davleniyakh do 1000 bar. – V kn.: Teplofizicheskiye svoystva uglevodorodov, ikh smesey, neftey i neftyanykh fraktsiy. M., 1973, v. 1, p.181-186. [Porkhun A.I., Bolotin N.K. An experimental set-up for studying the density of light hydrocarbons at low temperatures and pressures up to 1000 bar. - In the book: Thermophysical properties of hydrocarbons, their mixtures, oils and oil fractions. M., 1973, No. 1, pp. 181-186. (In Russ)]
8. Doolittle A.K. Specific volumes of n-alkanes. – J.Chem. and Eng. Data, 1964, Vol. 9, №2, pp.275-279.

9. Bridgman P. V. High pressure physics. - L.-M.: GONTINKTP-USSR, 1935 . 404 p. [Bridzhmen P. V. Fizika vysokikh davleniy. L.-M.: GONTINKTP-SSSR, 1935. 404 p. (In Russ)].
10. Cyclis D.S. The technique of physical and chemical research at high and ultrahigh pressures. - M.: Chemistry, 1965 . 416 p. Tsiklis D.S. Tekhnika fiziko-khimicheskikh issledovaniy pri vysokikh i sverkhvysokikh davleniyakh. - M.: Khimiya, 1965, 416 p. Cyclis D.S. The technique of physical and chemical research at high and ultrahigh pressures. - M.: Chemistry, 1965 . 416 p. (In Russ)]
11. Atanov YU.A., Borzunov V.A., Razumikhin V.N. Izmereniye szhimayemosti zhidkostey metodom sil'fonnogo p'yezometra pri davleniyakh do 10000 kgs/sm<sup>2</sup>. - Trudy/VNIIFTRI, 1964, v. 75 (135), s.143-150. [Atanov Yu.A., Borzunov V.A., Razumikhin V.N. Measurement of compressibility of liquids by bellows piezometer at pressures up to 10,000 kgf / cm<sup>2</sup>. Transactions / VNIIFTRI, 1964, issue. 75 (135), pp. 143-150. (In Russ)]
12. Shakhovskiy G.P., Lavrov I.A., Pushkinskiy M.D., Gonikberg M.G. Ustanovka dlya opredeleniya szhimayemosti zhidkostey. PTE, 1962, №1, s.181-183. [Shakhovsky G.P., Lavrov I.A., Pushkinsky M.D., Gonikberg M.G. Installation for determining the compressibility of liquids. - PTE, 1962, No. 1, pp.181-183. (In Russ)]
13. Borzunov V.A., Razumikhin V.N. Ustanovka dlya izmereniya plotnosti zhidkostey gidrostaticheskim metodom pri davleniyakh do 10000 kgs/sm. - Trudy/VNIIFTRI. 1964, vol.75 (135), pp.134-142. [Borzunov V.A., Razumikhin V.N. Installation for measuring the density of liquids by the hydrostatic method at pressures up to 10,000 kgf / cm. - Proceedings / VNIIFTRI. 1964, issue 75 (135), pp. 134-142. (In Russ)]
14. Pavlovich N.V., Timrot D.L. Eksperimental'noye issledovaniye zavisimosti r-V-T gazoobraznogo i zhidkogo metana. Teploenergetika, 1958, № 4, p.69-75. [Pavlovich N.V., Timrot D.L. An experimental study of the p-V-T dependence of gaseous and liquid methane. Thermal Engineering, 1958, No. 4, pp. 69-75. (In Russ)]
15. Golubev I.F. Opredeleniye udel'nogo vesa zhidkostey i gazov pri vysokikh davleniyakh metodom gidrostaticheskogo vzveshivaniya. Trudy/GIAP, 1957, v.7, pp.47-61. [Golubev I.F. Determination of the specific gravity of liquids and gases at high pressures by hydrostatic weighing. Transactions / GIAP, 1957, Issue 7, pp. 47-61. (In Russ)]
16. Golubev I.F., Dobrovol'skiy O.A. Izmereniye plotnosti azota i vodoroda pri nizkikh temperaturakh i vysokikh davleniyakh metodom gidrostaticheskogo vzveshivaniya. Gazovaya promyshlennost', 1964, № 5, s.43-47. [Golubev I.F., Dobrovolsky O.A. Measurement of the density of nitrogen and hydrogen at low temperatures and high pressures by hydrostatic weighing. The gas industry, 1964, No. 5, pp. 43-47. (In Russ)]
17. Katsnel'son O.G., Edel'shteyn A.S. Avtomaticheskkiye izmeritel'nyye pribory s magnitnoy podveskoy. Moscow.: Energiya, 1970. 216 p. [Katsnelson O.G., Edelstein A.S. Automatic measuring devices with magnetic suspension. - M.: Energy, 1970. 216 p. (In Russ)]
18. Voskanyan P.O., Kraynov V. P., Vorob'yev A.N., Nikitskiy V.B. Ustanovka dlya izmereniya vesa tela, nakhodyashchegosya v zamknutom sosude. - Zav.laboratoriya, 1976, t.42, № 3, pp.310-311. [Voskanyan P.O., Kraynov V.P., Vorobyov A.N., Nikitsky V.B. Installation for measuring body weight in a closed vessel. Head of laboratory, 1976, t. 42, No. 3, pp. 310-311. (In Russ)]
19. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Mukhamedzyanov G. Kh., Abdulagatov I.M. Experimental study of the density and viscosity of polyethylene glycols and their mixtures at temperatures from 293 K to 473 K and at atmospheric pressure. J. Chem. Thermodynamics, 2011, Vol.43, №12, pp.1824-1843.
20. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Alyev V.A., Musin R.Z., Abdulagatov I.M. Density of working liquids for diffusion vacuum pumps. J. Chem. Eng. Data, 2018, Vol.63, pp.1698-1705.
21. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Abdulagatov I.M. Viscosity and density of polyethylene glycols and their mixtures. LAP LAMBERT, Academic Publishing, 2017. 146 p.
22. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Mukhamedzyanov G. Kh., Abdulagatov I.M. Experimental study of the density and viscosity of n-heptane at temperatures from 298 K to 470 K and pressure up to 245 MPa. Int. J. Thermophys., 2013, Vol.34, No.1, pp.1-33.
23. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Abdulagatov I.M. Viscosity and density of n-heptane at high temperatures and pressures. LAP LAMBERT, Academic Publishing, 2017. 91 p.
24. Sagdeev D.I., Fomina M.G., Abdulagatov I.M. Density and viscosity of propilen glycol at high temperatures and high pressures. Fluid Phase Equilibria, 2017, t. 450, pp.99-111.
25. Turubiner I.K., Ippits M.D. Tekhnika izmereniya plotnosti. Moscow.: Mashgiz, 1949, 127 p. [Turubiner I.K., Ippits M.D. Density measurement technique. M.: Mashgiz, 1949, 127 p. (In Russ)]
26. GOST 8.207-76. Pryamyye izmereniya s mnogokratnymi nablyudenyami. Metody obrabotki rezul'tatov nablyudeniy. V. s 01.01.77. 10 p. [GOST 8.207-76. Direct measurements with multiple observations. Methods for processing the results of observations. - Enter. from 01.01.77. 10 p. (In Russ)]
27. GOST MI 2083-90 GSI. Izmereniya kosvennyye. Opredeleniye rezul'tatov izmereniy i otsenivaniye ikh pogreshnostey. V. s 01.01.92. 10 p. [GOST MI 2083-90 GSI. The measurements are indirect. Determination of measurement results and evaluation of their errors. - Enter. from 01.01.92. 10 p. (In Russ)]
28. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement; ISO: Geneva, Switzerland, 1993, (ISBN 92-67-10188-9)
29. D.I. Sagdeev, I.R. Gabitov, Ch.Kh. Isyanov, V.F. Khairutdinov, M.I. Farakhov, Z.I. Zaripov, I.M. Abdulagatov. Temperature Effect on Density and Viscosity of Oleic Acid. J Am Oil Chem Soc., 2019, Vol.96, pp.647-662.

**Сведения об авторах:**

Сагдеев Дамир Исмагилович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок»; e-mail: [sagdeev@mail.ru](mailto:sagdeev@mail.ru)

Абдулагатов Ильмутдин Магомедович, доктор технических наук, профессор кафедры «Физической химии»; e-mail: [ilmutdina@gmail.com](mailto:ilmutdina@gmail.com)

Никулин Николай Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника»; e-mail: [nikulinnk@gmail.com](mailto:nikulinnk@gmail.com)

Тюлькин Владислав Игоревич, студент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника физических установок»; e-mail: [tyulkin.vladislav@mail.ru](mailto:tyulkin.vladislav@mail.ru)

**Information about authors:**

Damir I. Sagdeev, Cand. Sci. (Technical), Ass. Prof., of the Department «Vacuum Technology of Electrophysical Installations»; e-mail: [sagdeev@mail.ru](mailto:sagdeev@mail.ru)

Ilmutdin M. Abdulagatov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Physical Chemistry; e-mail: [ilmutdina@gmail.com](mailto:ilmutdina@gmail.com)

Nikolay.K. Nikulin, Cand. Sci. (Technical), Ass. Prof., of the Department «Vacuum and compressor technology»; e-mail: [nikulinnk@gmail.com](mailto:nikulinnk@gmail.com)

Vladislav.I. Tyulkin, Student of the Department «Vacuum and compressor technology of physical installations»; e-mail: [tyulkin.vladislav@mail.ru](mailto:tyulkin.vladislav@mail.ru)

**Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 28.09.2019.

**Принята в печать** 21.10.2019.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 28.09.2019.

**Accepted for publication** 21.10.2019.