

С. Д. Г л у х о в, А. Н. Л е в к о,
Е. Г. Б ы ч к о в

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ХЛАДАГЕНТА RE170

Экспериментальные сведения о динамической вязкости диметилового эфира очень ограничены. Для проведения данного исследования на кафедре Э-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана был создан экспериментальный стенд, позволяющий проводить исследования вязкости жидкостей и газов методом капилляра в диапазоне температур от -40 до $+60$ °С при давлении до 3,5 МПа. Приведены описание этого стенда и результаты эксперимента.

E-mail: alexandrutz@rambler.ru; euginne_bmstu@mail.ru

Ключевые слова: коэффициент динамической вязкости, диметиловый эфир, хладагент, дизельное топливо.

Проблема генерации энергии и холода на транспортных средствах имеет огромное значение для мегаполисов крупных городов и густонаселенных регионов, где сосредоточены важнейшие технические и технологические достижения XX в.: двигателе- и автомобилестроение, химическое машиностроение, атомное машиностроение и энергетика, холодильная и криогенная техника, пищевые производства для аэрокосмических и химических комплексов и др. [1]. В ряде крупнейших мегаполисов мира (например, в Лос-Анджелесе, Токио, Лондоне, Шанхае) приняты жесткие ограничения, в первую очередь, в отношении транспортных средств, систем охлаждения, отопления, фильтрации, очистки, регламентированы свойства рабочих веществ многих энерго-силовых холодильных установок, а также различных потребительских товаров.

В последние годы диметиловый эфир (ДМЭ) считается перспективным топливом для транспортных дизелей, в первую очередь, благодаря возможности значительного снижения выбросов вредных веществ с отработанными газами (Еуро III без использования нейтрализаторов). Свойства ДМЭ служат объективными предпосылками для создания комбинированных энергетических установок городского транспорта, включающих в себя двигатель и холодильный агрегат. В МГТУ им. Н.Э. Баумана проводились исследования ДМЭ в качестве компонента дизельного топлива и хладагента. Применение ДМЭ как хладагента, так и компонента дизельного топлива требует знания коэффициентов динамической вязкости ДМЭ и его смеси с дизельным топливом. Сведения о динамической вязкости ДМЭ очень ограничены. Для газа имеется три значения, для жидкости — всего одно значение $\eta'_{\text{жсп}} = 0,11$ МПа. Для получения зависимости вязкости газа и вязкости жидкости в интересующем нас диапазоне температур (от -40

до $+60^{\circ}\text{C}$) были использованы различные теории [2–5]. Результаты приведены на рис. 1 и 2.

Экспериментальное исследование вязкости предполагается проводить методом капилляра, наиболее точным из используемых в экспериментальной практике. Кроме того, его относительно просто реализовать на практике и он хорошо описан в литературе [6]. Для реализации данного метода был создан экспериментальный стенд, позволяющий исследовать вязкости жидкостей и газов методом капилляра в диапазоне температур от -40 до $+60^{\circ}\text{C}$ при давлении до 3,5 МПа.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 3. Капилляр 2 диаметром d (внутренним), длиной L размещен в корпусе вискозиметра 1. Исследуемое вещество в жидкой фазе от блока подачи жидкости (БПЖ-80) с постоянным расходом подается в змеевик термостата (ТМ) измерительного блока и попадает в камеру вискозиметра, приобретая температуру и давление исследуемой среды. Эти параметры регистрируют термометром сопротивления t_0 и манометром p_0 . На капилляре измеряется перепад давления Δp_0 . После этого исследуемое вещество

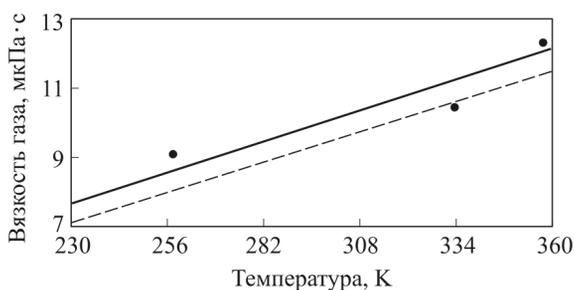


Рис. 1. Теоретическая вязкость газа ДМЭ по Чемпену–Экстону (сплошная прямая), по Голубеву (штриховая); ● — экспериментальные данные

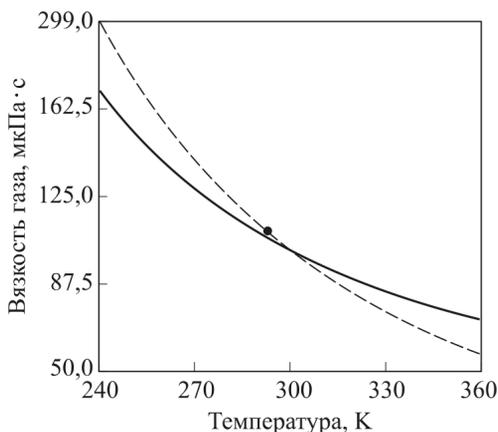


Рис. 2. Теоретическая вязкость жидкости ДМЭ по Оррику и Эрбару (сплошная кривая); по Ван-Вельцену (штриховая); ● — экспериментальные данные

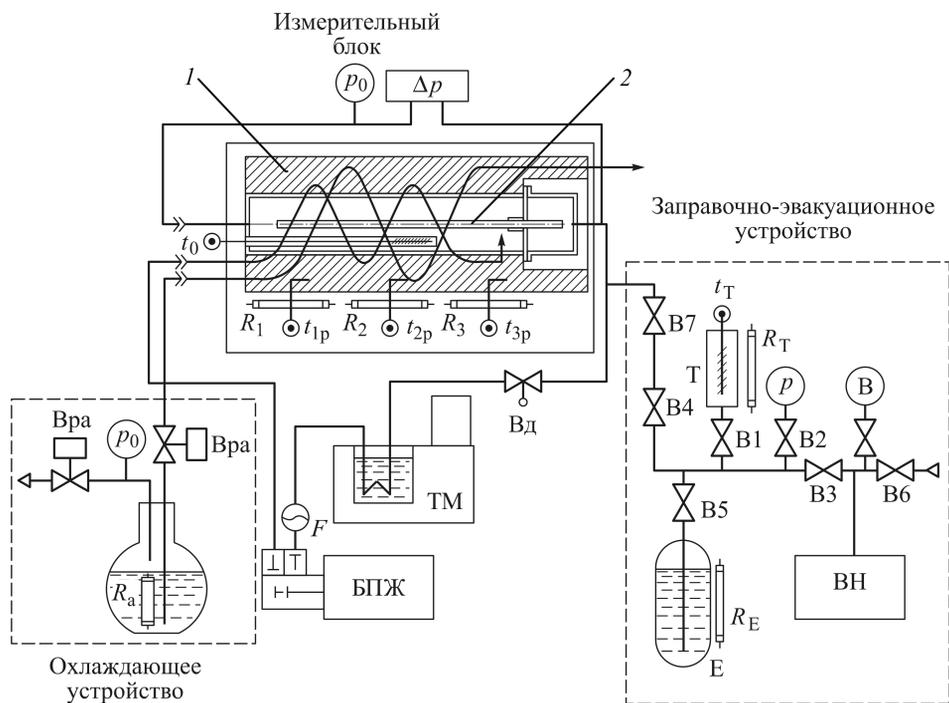


Рис. 3. Схема установки для измерения вязкости:
 В — вакуумметр; Δp — измеритель разности давлений

через дроссельный вентиль (Вд) поступает в змеевик, охлаждаемый жидкостью в термостате. При измерении вязкости исследуемых веществ в области низких температур применяют жидкий азот. Его подачу в змеевик термостата вискозиметра обеспечивает соленоидный вентиль (Вра) по команде регулятора температуры от одного из датчиков (t_{1p} , t_{2p} , t_{3p}), которые одновременно служат и для подачи команды на выравнивание температурного поля по длине термостата с помощью секционных нагревателей (R_1 , R_2 , R_3). Наружный нагреватель (R_n) с датчиком (t_n) служит для обеспечения однофазного состояния исследуемого вещества в импульсных трубках для измерения давления p и перепада давления Δp_0 . Шаровый кран Вра используют для отбора исследуемого вещества на анализ. Остальные запорные вентили $B_1 \dots B_7$ — технологические. Необходимое первоначальное избыточное давление исследуемого вещества в контуре вискозиметра создают с помощью термокомпрессора (Т) при контроле температуры датчиком (t_T). Фильтр (F) служит для защиты клапанов БПЖ от твердых частиц. Первоначально контур вискозиметра заполняют жидкой фазой после предварительного вакуумирования вакуумным насосом ВН из переносной заправочной емкости Е с электрическим нагревателем R_E . Эту же емкость используют для хранения исследуемого вещества после окончания измерений. Значение вязкости η , Па·с, измеряемой

методом капилляра, определяют по формуле, полученной из уравнения Гагена–Пуазейля [6]:

$$\eta = \frac{\pi \Delta p r^4}{8 L Q} - \frac{m Q \rho}{8 \pi L}, \quad (1)$$

где Δp — перепад давления на капилляре, Па; r — внутренний диаметр капилляра, м; L — длина капилляра, м; Q — объемный расход вещества, проходящего через капилляр, м³/с; ρ — плотность вещества, кг/м³; m — коэффициент, учитывающий влияние потока у концов капилляра, равный 1,12 [6] (на основе опытных данных). В относительном варианте вязкость находят по формуле

$$\eta = A [1 + 3\alpha(t - t_0)] \frac{\Delta p}{Q} - \frac{B Q \rho}{1 + \alpha(t - t_0)} S, \quad (2)$$

где A и B определяют по результатам градуировки вискозиметра; α — коэффициент линейного расширения материала капилляра, 1/град; t — температура исследуемого вещества; $t_0 = 20^\circ\text{C}$; Δp , Q и ρ — соответствуют формуле (1). Управляют работой стенда и регистрируют измерения с помощью ЭВМ.

Градуировку рабочего участка вискозиметра при заданных внутреннем диаметре и длине капилляра проводят на веществах с известной вязкостью в рабочем интервале параметров. Обычно используют дистиллированную воду, бензол, толуол.

Значения коэффициентов A и B определяют по результатам обработки экспериментальных данных по формуле (2). Коэффициенты линейного расширения берут из справочных данных для материала, из которого изготовлен капилляр.

Градуировку вискозиметра выполняют при условии ламинарности движения вещества в капилляре, т.е. в области чисел Рейнольдса до 2000. Перепад давления в капилляре определяется прибором (классом точности измерений не хуже 0,1). Значение случайной погрешности измерений определяют по результатам не менее семи измерений с доверительной вероятностью 0,95; температуру исследуемого вещества — по показаниям платинового термометра сопротивления (точность не ниже класса А). Объемный расход исследуемого вещества, измеренный на приборе БПЖ-80, пересчитывают на параметры градуировочного вещества в капилляре.

Измерение вязкости исследуемых веществ проводят так же, как и градуировку. При измерениях в жидкой и газовой фазах необходимо следить, чтобы режим течения был ламинарным. При этом экспериментальные данные не должны зависеть от гидродинамических параметров в капилляре. Во всех случаях необходимо соблюдать постоянство расхода исследуемого вещества в процессе измерения, а также постоянство температуры и давления.

Измеренные значения расхода, пересчитанные на параметры в капилляре значения перепадов давления, среднего давления в капилляре и температуры используют при расчете вязкости по формуле (2).

Погрешность измерений вязкости складывается из погрешности градуировочных коэффициентов A и B в рабочей формуле (2) и погрешности измеряемых величин с надежностью 0,95, которые зависят от класса используемых приборов и ошибок измерений, т.е. случайных ошибок [7]. Общая погрешность экспериментальных данных при

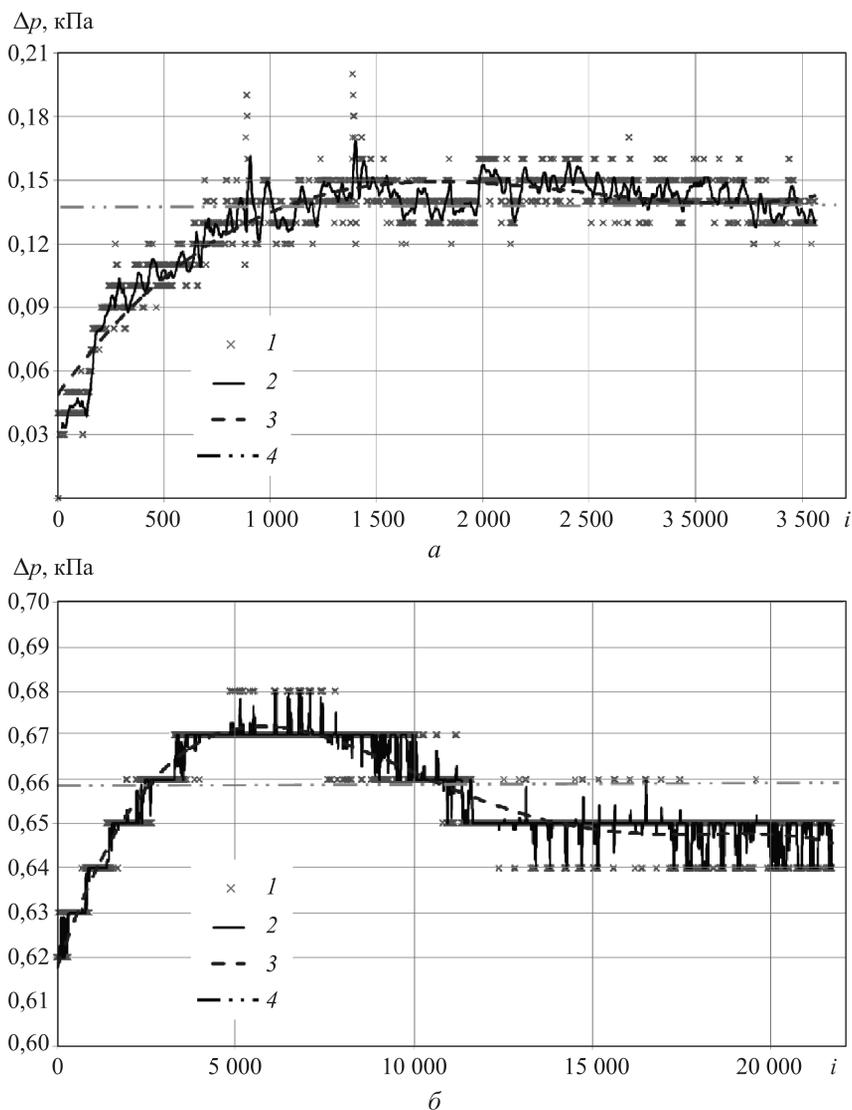


Рис. 4. Пример экспериментального измерения вязкости методом капилляра (измеряется перепад давления Δp , и далее по формуле (2):
 a – хладагент R134a, $\xi = 3,42\%$, $n = 3$; $\Delta p_T = 135,7$ Па; b – изопропиловый спирт, $\xi = 1,4262\%$; $n = 4$; $\Delta p_T = 659$ Па; \times – эксперимент; — — линейная фильтрация; --- — полиномиальная ($n = 3$); - · - · - Δp_T

измерении вязкости исследуемых веществ включает в себя и ошибки отнесения по температуре и давлению. При исследовании бинарных или многокомпонентных смесей необходимо учитывать погрешность состава измеряемой смеси веществ с оценкой возможного влияния различных технологических примесей.

В настоящее время ведется тарировка экспериментального стенда. Получены результаты по следующим веществам: хладагенты R134a и R404a, вода, изопропиловый спирт, толуол. Результаты измерения перепада давлений для хладагента R134a и изопропилового спирта приведены на рис. 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А к о б и я Ш. Е., С м и р н о в а Т. Н. Перспективы снижения вредных выбросов при применении диметилэфира // Грузовик &. – 1999. – № 2. – С. 30.
2. Б а д ы л ь к е с И. С. Рабочие вещества и процессы холодильных машин. – М.: Гос. изд-во торговой литературы, 1962. – 256 с.
3. Б а д ы л ь к е с И. С. Рабочие вещества холодильных машин (холодильные агенты). – М.: Пищепромиздат, 1952. – 250 с.
4. Б а д ы л ь к е с И. С., Б у х т е р Е. З., В е й н б е р г Б. С. Холодильная техника: Энциклопедический справочник. В 3 кн. – М.: Госторгиздат, 1960. – Кн. 1. – 544 с.
5. Р и д Р., П р а у с н и ц Дж., Ш е р в у д Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие: Пер. с англ./ Под ред. Б.И. Соколова.- 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
6. Г о л у б е в И. Ф. Вязкость газов и жидкостей (справочное руководство). – М.: Госиздат физ. мат. литературы, 1959. – 375 с.
7. Р а б и н о в и ч С. Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия. 1978. – 262 с.

Статья поступила в редакцию 27.06.2012