УДК 532.133;621.039.4

ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ И ПЛОТНОСТИ РАСТВОРОВ КОН ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

© 2020 г. К. И. Кузнецов¹, С. В. Скородумов¹, П. П. Гранченко^{1, *}

¹Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", Москва, Россия

**E-mail: granchenkop@gmail.com* Поступила в редакцию 10.05.2018 г. После доработки 11.09.2019 г. Принята к публикации 10.03.2020 г.

Получены уравнения, описывающие плотность и динамическую вязкость растворов КОН в интервалах температур 20–70°С и концентраций 10–40%. Исследования динамической вязкости и плотности проводились на построенной экспериментальной установке, включающей в себя вискозиметр SV-10. Отклонения расчетных данных от экспериментальных не выходят за пределы доверительного интервала. Неопределенность полученных экспериментальных данных не превышает 1.91% для плотности и 3.56% для динамической вязкости.

DOI: 10.31857/S0040364420060125

введение

Развитие атомной энергетики и предстоящее внедрение в энергетическую отрасль на промышленной основе термоядерной энергетики требуют разработки новых эффективных методов преобразования различных видов энергии, извлеченной в процессе ядерных и термоядерных реакций, в тепловую энергию. Традиционный метод преобразования всех видов лучевой энергии с помошью водяного контура в активной зоне хорошо разработан, но обладает целым рядом существенных недостатков. Найдены пути устранения некоторых недостатков, влияющих на безопасность процесса преобразования (радиолиз воды, прогар поверхностей теплообмена и др.). Однако такой существенный недостаток, как низкая рабочая температура, не превышающая 350°С, не позволяет обеспечить высокий термический КПД энергетических установок, а необходимость применения особых паротурбинных установок, совершающих работу во влажном паре, снижает их надежность. Надо отметить, что современные тепловые электростанции имеют температуру острого пара более 550°С и обеспечивают термический КПД более 45%.

Преодоление всех перечисленных недостатков требует разработки новых теплоносителей активной зоны ядерных и термоядерных энергетических установок. Такими теплоносителями могут стать расплавы металлов, обладающие хорошей способностью преобразования всех видов излучения в теплоту, а также расплавы солей с аналогичными свойствами. Опыт использования жидкометаллических теплоносителей уже накоплен: применяются щелочные металлы, имеющие низкую температуру плавления, а также используются особые лигатуры на основе свинца (установка "Брест"). Последние более перспективны, так как щелочно-металлические теплоносители создают высокий уровень опасности при нарушении герметичности в зоне второго контура. Применение жидкометаллических теплоносителей и расплавов солей при высоких температурах требует особых подходов к их транспортировке от активной зоны к энергетической установке с помощью магнитогидродинамического насоса, обеспечивающего перекачку, не нарушающую герметичность системы при высоких температурах, а также к исследованию теплообменных процессов, обусловленных наличием электромагнитных полей. Кроме того, следует уделить особое внимание изучению магнитогидродинамических процессов при преобразовании энергии, выделяемой термоядерными энергетическими установками.

Первым шагом к таким разработкам являются исследования процессов в веществах с аналогичными свойствами при параметрах состояния, доступных для исследований и не требующих значительных материальных средств. Этим исследованиям посвящена настоящая работа.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве моделирующей жидкости выбран раствор едкого калия (КОН). Данный раствор обладает достаточно высокой электропроводностью и является сильным электролитом, что позволяет с его помощью выполнять магнитогидродинамическое моделирование. Данные о теплофизических свойствах растворов КОН опубликованы в различных отечественных и зарубежных источниках. Однако данные о вязкости и плотности, достаточные для построения полиномиальной зависимости, охватывающей весь необходимый для выполнения поставленной задачи температурный диапазон ($20-70^{\circ}$ С) и диапазон по концентрациям (10-40%), в доступной литературе авторами не обнаружены. Данные о вязкости и плотности обессоленной воды, необходимые для калибровки вискозиметра, а также как элемент массива с нулевой концентрацией, приняты из надежного источника [1].

В настоящей работе приведены ссылки на результаты исследований: динамической вязкости при атмосферном давлении, концентрации, изменяемой от 10 до 30%, и температуре 20°С [2]; вязкости и плотности при 25°С с изменением молярной концентрации от 0.5 до 14.0 моль/л [3]. Плотность при атмосферном давлении, представленная в работах зарубежных авторов [4–7], охватывает весь исследуемый в настоящей работе диапазон, хорошо согласуется с проведенными исследованиями. Вместе с тем это не отменяет необходимость проведенных измерений. Так, например, в работе [8] выполнены экспериментальные измерения при температурах 20, 30, 40°С, но при концентрациях от 8 до 10%; в [9] температурный диапазон лежит ниже 0°С; в [6] получены данные о плотности в диапазоне концентраций от 0 до 77.1% и температуры от 60 до 160°С; в [7] изучен диапазон 25–75°С при концентрации до 3M(моляльность); в [10] авторами приведены данные о плотности раствора КОН для температур 0–70°С и массовых концентраций от 0 до 50% без ссылок на собственные экспериментальные измерения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

С целью последующего моделирования магнитогидродинамических процессов в электропроводных жидкостях экспериментально измерены динамическая вязкость и плотность раствора гидрата окиси калия, используемого в качестве модельного образца (электропроводной жидкости с ионной проводимостью), в зависимости от концентрации и температуры при атмосферном давлении.

Исследования динамической вязкости и плотности растворов проводились на экспериментальной установке, представленной на рис. 1.

Экспериментальная установка включает в себя модернизированный для измерений в рабочем диапазоне параметров состояния вискозиметр SV-10 и выносной жидкостный термостатирую-



Рис. 1. Экспериментальная установка для измерения динамической вязкости жидкостей: 1 – внутренний измерительный узел вискозиметра, 2 – радиатор теплоотвода, 3 – вентилятор, 4 – медная пластина тепловой защиты внутреннего измерительного узла, 5 – колеблющиеся диски вискозиметра, 6 – исследуемый раствор КОН, 7 – подъемный столик вискозиметра, 8 – кювета вискозиметра, 9 – термостатирующий узел кюветы, 10 – защитный теплоизоляционный экран, 11 – термопара на стальной пластине, 12 – стальная пластина вискозиметра, 13 – жидкостный термостат, 14 – цифровой измеритель температуры ТЦ-1200, 15 – ареометр, 16 – герметизирующая крышка кюветы (устанавливается в режиме изменения температуры), 17 – термопарный термометр герметизирующей крышки кюветы, 18 – двухканальный универсальный измеритель OBEH 2TPM-1, 19 – вторичный прибор вискозиметра SV-10.

ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР том 58 № 6 2020

щий узел 9 с помещенной в него кюветой 8. Для измерения плотности исследуемого раствора в термостат 13 помещен мерный цилиндр с ареометром 15 и прецизионным платиновым термометром сопротивления pt-100/1 в комплекте со вторичным прибором ТЦ-1200 14 для измерения температуры жидкости. Насос термостата обеспечивал прокачку воды через выносной термостатирующий узел. Вискозиметр SV-10 основан на зависимости механической нагрузки на колеблющиеся диски от вязкости исследуемого вещества. С целью расширения температурного диапазона вискозиметра, а также адаптации измерительного узла к исследуемой среде, была проведена его модернизация. Модернизация измерительного узла вискозиметра обусловлена: во-первых, необходимостью исключения фактора влияния конвективных потоков от выносного термостатирующего узла к измерительным элементам прибора: во-вторых, необходимостью снизить изменение состава исслелуемого раствора в течение опыта. Для снижения конвективных потоков от кюветы к приборному отсеку вискозиметра изготовлена медная теплозащитная пластина 4, не нарушающая работу вибрирующих дисков 5, с установленным на нее теплоотводящим радиатором 2 с вентилятором 3. Медная пластина расположена под штатной стальной пластиной 12, разделяющей внешний и внутренний 1 отделы вискозиметра. На стальной пластине закреплена термопара, обеспечивающая контроль температуры внутреннего измерительного узла. Так как длительность опыта в связи с изменением температурных режимов составляет несколько часов, что с открытой кюветой при повышенной температуре неминуемо повлечет изменение состава раствора, предприняты следующие меры: 1) стол вискозиметра с термостатируемой кюветой опускался из рабочей зоны на период изменения температурного режима; 2) на кювету устанавливалась герметизирующая крышка 16 с встроенным термопарным термометром 17, погруженным в раствор. Кроме того, в режиме измерения (при поднятом столе) над кюветой располагалась теплоизолирующая шторка с прорезью для погружаемых дисков, а в режиме изменения температурного режима на герметизирующую крышку устанавливалась сплошная теплоизолирующая шторка, исключающая восходящие потоки горячего воздуха. Измерения вязкости проводились кратковременно в течение 1-3 мин. При этом температура стальной пластины, разделяющей внешний и внутренний отделы измерительного узла, не превышала 28°С.

874

Измеряемой величиной вискозиметра SV-10 является произведение относительной плотности вещества ($\rho/\rho_{вод}$) и динамической вязкости μ (приведенная вязкость). В связи с этим возникла необходимость одновременно с измерениями,

проводимыми вискозиметром, измерять плотность исследуемых растворов. Для обеспечения точных измерений проведена калибровка прибора по двум точкам, охватывающим рабочий диапазон измеряемой вязкости согласно штатной инструкции. Для этого в первом состоянии использовалась обессоленная вода, имеющая значение динамической вязкости вблизи низшего значения рабочего диапазона. Данные по вязкости и плотности воды взяты из таблиц [1]. Во втором состоянии использовался 30%-ный раствор хлористого кальция, имеющий динамическую вязкость, превышающую величину верхней границы рабочего диапазона [11].

Для измерения плотности раствора в жидкостный термостат 13 помещался мерный цилиндр, заполненный раствором едкого калия 6 соответствующей концентрации, с помещенным в него ареометром 15 класса 0.5. Температура в кювете при выходе на каждый температурный режим измерялась встроенным в герметизирующую крышку термопарным термометром 17 в комплекте с двухканальным вторичным прибором OBEH 2TPM-1 18. Ко второму входу вторичного прибора подключалась термопара, установленная на защитной пластине вискозиметра.

Перед проведением каждого эксперимента составлялся раствор с необходимой концентрацией. Операция выполнялась весовым методом с использованием электронных аналитических весов с дискретизацией младшего разряда 1 мг и возможностью задания начала отсчета при любой нагрузке в пределах 320 г. На электронные весы устанавливалась колба для приготовления раствора. За начало отсчета принималась чаша весов со свободной колбой. Медленным заполнением колбы обессоленной водой при помощи пипетки достигалось необходимое значение измеряемой массы. Эта масса принималась как новое значение начала отсчета, и в колбу вносилось необходимое количество обезвоженной химически чистой гидроокиси калия. После выполнения описанных операций колба закрывалась герметизирующей крышкой. Доверительный интервал по составу используемого раствора оценивается как ±1%.

Доверительный интервал измеренной плотности $\delta\rho$ может быть рассчитан как суммарная погрешность измерения плотности ареометром $\delta\rho_a$ и погрешностей отнесения измеренной плотности к температуре опыта *t* (в °C) и концентрации исследуемого раствора *c* (в %):

$$\begin{split} \delta \rho_t &= \frac{100\%}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_c \Delta t \approx 0.004\%, \\ \delta \rho_C &= \frac{100\%}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial c} \right)_t \Delta C \approx 1.63\%. \end{split}$$

c, %

c, %	t, °C	ρ, кг/м ³
5	15.75	1040.2
	21.72	1038.2
	35.18	1035.6
	40.22	1035.3
	49.88	1034.8
	61.77	1034.3
	11.61	1194.0
	24.35	1189.0
20	32.05	1185.5
	44.97	1179.1
	54.62	1173.7
	68.22	1165.3
30	23.17	1288.3
	31.81	1284.9
	38.68	1281.8
	49.26	1276.3
	60.43	1269.4
	70.28	1262.6
40	31.87	1365.0
	40.52	1358.0
	55.98	1346.0
	71.43	1338.0

Таблица 1. Результаты измерения плотности

Таблица 2. Результаты измерения динамической вязкости t. °C

10	24.1	1.140
	30.6	0.976
	39.4	0.789
	50.3	0.604
	59.6	0.491
	62.6	0.478
	19.9	1.65
	25.2	1.56
	30.3	1.37
20	39.7	1.06
	49.8	0.836
	61.3	0.664
	66.5	0.605
	17.6	2.376
	20.9	2.31
	28.8	1.97
30	30.1	1.92
50	40.7	1.55
	48.9	1.34
	62.4	1.088
	68.5	1.003
	18.2	4.32
	22.3	3.71
40	30.1	3.34
	39.7	3.06
	51.4	2.73
	59.8	2.52
	67.9	2.33

С учетом приборной погрешности ареометра

$$\delta \rho = \sqrt{(\delta \rho_a)^2 + (\delta \rho_c)^2 + (\delta \rho_t)^2} = 1.91\%$$

Результаты экспериментальных измерений плотности представлены в табл. 1.

АППРОКСИМАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Зависимость результатов измерений плотности раствора КОН от параметров состояния в интервале изменения массовых концентраций и температур (c = 0 - 40%, $t = 20 - 70^{\circ}$ C) описывается vpавнением

 $\rho = 1000.51 + 12.1435c - 0.161383c^2 +$ $-0.00199601c^{3}\sqrt{t}+0.108532ct -0.00995340c^{2}t + 0.000165968c^{3}t.$

Доверительный интервал измеряемой величины рµ, согласно паспортным данным вискозиметра SV-10, составил $\pm 3\%$. Таким образом, суммарный доверительный интервал (инструментальная погрешность) измеренной вязкости и зависит от перечисленных выше факторов и может быть оценен как

$$\delta\mu = \sqrt{(\delta\mu\rho)^2 + (\delta\rho)^2}.$$

Тогда доверительный интервал измеренной вязкости с учетом погрешностей отнесения составляет $\delta \mu = \pm 3.56\%$.

Результаты экспериментальных измерений линамической вязкости представлены в табл. 2.

Зависимость результатов измерений вязкости от параметров состояния в рабочем интервале изменения массовых концентраций и температур $(c = 0-40\%, t = 20-70^{\circ}C)$, а также данных о вязкости воды [1] и литературных данных при 20°С [2] описывается уравнением вида

$$\mu = \sum_{i=0}^{4} \sum_{j=1}^{3} b_{i,j} c^{i} t^{j}.$$
 (1)

μ, мПа с



Рис. 2. Графическая интерпретация зависимости вязкости от концентрации и температуры по данным: 1 настоящей работы, $2 - H_2O[1]$, 3 - [2], 4 - [3], 5 - [4].



Рис. 3. Отклонения данных, рассчитанных по (1), от результатов измерений при: 1 - c = 10%, 2 - 20, 3 - 30, 4 - 40.



Рис. 4. Отклонения данных литературных источников от результатов расчета по (1) при: $1 - t = 20^{\circ}$ C [2], $2 - 25^{\circ}$ C [3].



Рис. 5. Отклонения справочных данных [1] о динамической вязкости воды от рассчитанных по (1) значений.

Таблица З.	Коэффициенты	уравнения	(1))
------------	--------------	-----------	-----	---

	•••
$b_{0,1}$	32.8074
$b_{0,2}$	-292.147
$b_{0,3}$	941.402
$b_{1,1}$	-2.12909
<i>b</i> _{1,2}	72.4232
<i>b</i> _{1,3}	-646948
$b_{2,1}$	0.797615
<i>b</i> _{2,2}	0.715697
b _{2,3}	-62.1809
$b_{3,1}$	-0.00888673
b _{3,2}	-0.00483085
b _{3,3}	2.408
$b_{4,1}$	0.000209089
$b_{4,2}$	-0.00355252
$b_{4,3}$	0.00897189

Коэффициенты уравнения (1) представлены в табл. 3.

Зависимость динамической вязкости от параметров состояния (c, t) показана на рис. 2 в виде поверхности с нанесенными на нее маркерами, соответствующими данным из различных источников.

Отклонения результатов расчета по уравнению (1) от результатов измерений представлены на рис. 3.

Отклонения данных из литературных источников от рассчитанных по уравнению (1) приведены на рис. 4.

Отклонения справочных данных о динамической вязкости воды от рассчитанных по (1) значений при c = 0% представлены на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Построена новая экспериментальная установка для измерения динамической вязкости и плотности водных растворов на основе вибровискозиметра SV-10.

2. Проведены экспериментальные исследования плотности и динамической вязкости растворов едкого калия в интервале температур 20–70°С, массовых концентраций 10–40% при атмосферном давлении.

3. По результатам экспериментальных исследований и на основе справочных данных построены уравнения, описывающие плотность и динамическую вязкость растворов КОН в рассмотренных интервалах температур и концентраций. 4. Выполнено сравнение расчетных данных по полученному уравнению с результатами экспериментальных исследований. Отклонения не выходят за пределы доверительных интервалов. Вместе с тем различия характера отклонений данных разных источников от результатов, полученных по аппроксимирующим уравнениям, подтверждают необходимость проведенных измерений.

5. Работа является продолжением [12, 13], и результаты проведенных исследований теплофизических свойств используются в экспериментальном моделировании магнитогидродинамических процессов в научной лаборатории ОИВТ РАН.

Работа выполнена при поддержке мегагранта Правительства РФ № 14.Z50.31.0042.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики. Спр. М.: Изд-во МЭИ, 2017. С. 226.
- 2. *Wolf A.V., Hoeber A.V.* Aqueous Solutions and Body Fluids. Their Concentrative Properties and Conversion Tables. Medical Division. N.Y.: Harper & Row Publ., 1966. P. 182.
- Sipos P.M., Hefter G., May P.M. Viscosities and Densities of Highly Concentrated Aqueous MOH Solutions // J. Chem. Eng. Data. 2000. V. 45(4). P. 613.
- 4. The Solubility of Gases in Liquids: Thermodynamic Considerations // Ed. Battino R. IUPAC Solubility Data Series. V. 10. Oxford: Pergamon Press, 1994.

- Akerlof G., Bender P. The Density of Aqueous Solutions of Potassium Hydroxide // J. Am. Chem. Soc. 1941. V. 63. № 4. P. 1085.
- Tham M.J., Gubbins K.E., Walker Jr. R.D. Densities of Potassium Hydroxide Solutions // J. Chem. Eng. Data. 1967. V. 12(4). P. 525.
- Herrington T.M., Pethybridge A.D., Roffey M.G. Densities of Aqueous Lithium. Sodium and Potassium Hydroxides from 25 to 75 Degree. C at 1 atm // J. Chem. Eng. Data. 1986. V. 31(1). P. 31.
- 8. *Hitchcock L.B., Mcilhenny J.S.* Viscosity and Density of Pure Alkaline Solutions and Their Mixtures // Ind. Eng. Chem. 1935. V. 27. № 4. P. 461.
- Kelly W.R., Borza P.F., Harriger R.D. Densities and Viscosities of Potassium Hydroxide Solutions at Low Temperatures // J. Chem. Eng. Data. 1965. V. 10. № 3. P. 233.
- Selected Values of Physical and Thermodynamic Properties of Hydrocarbons and Related Compounds / API Project 44. Pittsburgh, Pa: Carnegie Press, 1948.
- 11. *Цыдзик В.Е., Бармин В.П., Вейнберг Б.С.* Холодильные машины и аппараты. М.: Машгиз, 1946.
- Belyaev I.A., Biryukov D.A., Belavina E.A., Sviridov V.G. Experimental Study of Molten Salt Mixed Convection in a Pipe Affected by Transverse Magnetic Field // Magnetohydrodynamics. 2019. V. 55. № 1–2. P. 241.
- 13. Belyaev I.A., Sviridov V.G., Batenin V.M. et al. Test Facility for Investigation of Heat Transfer of Promising Coolants for the Nuclear Power Industry // Thermal Eng. 2017. V. 64. № 11. P. 841.