

комнатной до 283° С и давлениях от 45 до 325 кг/см². Опыты показали, что влияние давления на вязкость D₂O в измеренном интервале температур и давлений можно принять таким же, как для H₂O.

с ростом температуры расхождение увеличивается. На рис. 2 представлены также результаты работы [7].

Поступило в Редакцию 2/VII 1959 г.

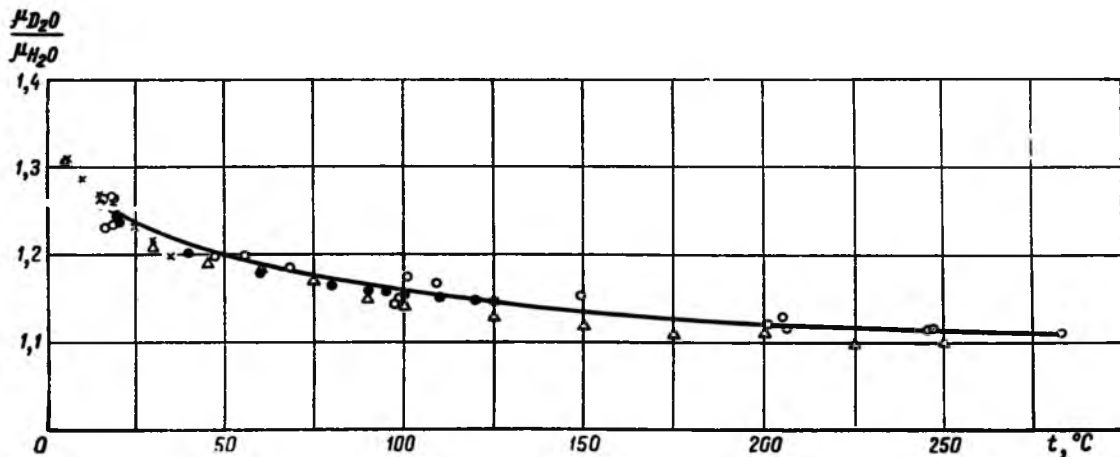


Рис. 2. Экспериментальные данные различных авторов по вязкости D₂O:

$\circ$ — данные настоящей работы; $\bullet$ — данные работы [2]; Δ — данные работы [1]; $\times$ — данные работы [7].

В табл. 1 приведены полученные нами экспериментальные значения вязкости D₂O, в табл. 2 — сглаженные значения вязкости D₂O при давлениях насыщения. Анализ погрешностей эксперимента показал, что максимальная ошибка наших измерений составляет $\pm 2\%$. Из данных видно, что отношение коэффициента вязкости D₂O к коэффициенту вязкости H₂O уменьшается с ростом температуры; так, при 20° С оно равно 1,24 а при 280° С — 1,11. Вязкость H₂O находилась по таблицам работы [6].

На рис. 2 дано сравнение наших данных с результатами других исследований. Значения отношений μ_{D_2O}/μ_{H_2O} , полученные в работе [2], согласуются с нашими данными с точностью до 1%. Значения из работы [1] меньше наших в среднем на 2%, причем

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Heiks, M. Barnett, L. Jones, E. Ordan. J. Chem. Phys., 58, 488 (1954).
2. R. Hardy, R. Cottoington. J. Chem. Phys., 17, 509 (1949).
3. Д. Тимрот. Изв. Всес. теплотехн. ин-та, № 3, (1940).
4. А. Хлопкина. Диссертация, МЭИ, 1954.
5. С. Л. Ривкина. Атомная энергия, 7, вып. 5, 457 (1959).
6. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. М., Госэнергоиздат, 1958.
7. N. Lewis, T. Macdonald. J. Amer. Chem. Soc., 55, No. 11, 4730 (1933).

Экспериментальное исследование теплоемкости тяжелой воды¹

С. Л. Ривкин, Б. Н. Егоров

Теплоемкость тяжелой воды исследовалась методом адиабатического проточного калориметра в замкнутой схеме циркуляции². Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Циркуляционный

¹ Работа была доложена в 1957 г. на научно-техническом совещании Всесоюзного теплотехнического института.

² Этот метод применялся во Всесоюзном теплотехническом институте для исследования теплоемкости H₂O и пара при высоких давлениях и температурах [1,2]. Для проведения настоящей работы была сооружена новая экспериментальная установка, существенно отличающаяся от прежних.

шестеренчатый насос подает D₂O в расходомер, откуда она поступает в межтрубное пространство теплообменника, нагревается в нем до установленной температуры и выходит в измерительный калориметр, помещенный в термостате. Из калориметра вода направляется в трубки теплообменника, где частично охлаждается встречным потоком, и, пройдя холодильник, возвращается в циркуляционный насос. Давление в установке создается азотом, поступающим из баллона в систему с ртутным затвором. Последняя позволяет получить одинаковое давление жидкости в установке и газа в сосуде высокого давления, в котором помещен циркуляционный насос и его привод (асинхронный двигатель),

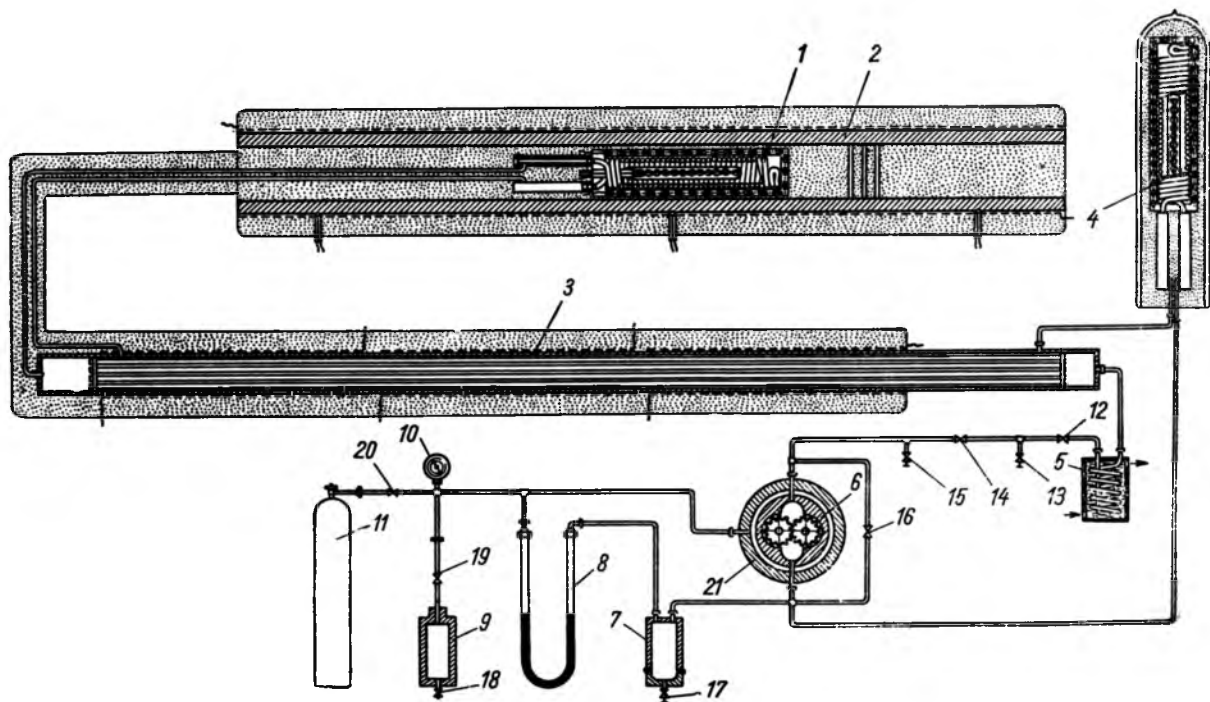


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — измерительный адиабатический калориметр; 2 — термостат; 3 — теплообменник; 4 — калориметр-расходомер; 5 — холодильник; 6 — циркуляционный шестеренчатый насос; 7 — ртутная ловушка; 8 — U-образная трубка; 9 — баллон; 10 — образцовый пружинный манометр; 11 — азотный баллон; 12 — регулировочный вентиль; 13 — вентили высокого давления; 20 — вентили высокого давления; 21 — сосуд высокого давления.

что разгружает насос от одностороннего высокого давления.

Использование циркуляционного насоса с приводом от асинхронного двигателя дало возможность получить постоянный расход D_2O в схеме циркуляции (колебания 0,1—0,2%) без применения специальных регуляторов расхода. Измерительный калориметр выполнен в виде бифилярного змеевика, к концам которого приварены гильзы для термопар. Внутри змеевика находится смонтированный на кварцевом каркасе нихромовый нагреватель, который питается от аккумуляторной батареи большой емкости. На змеевик надеты два медных цилиндра, выравнивающих температуру; в зазоре между ними смонтирована многоспайная дифференциальная термопара-тепломер, охватывающая всю поверхность калориметра. Таким образом, показания тепломера соответствуют интегральному теплообмену калориметра с окружающей средой. Адиабатичность калориметра достигается таким регулированием термостата, при котором показания тепломера равны (или близки) нулю. Тепломер служит также для измерения обычно очень небольшого некомпенсированного теплового потока через оболочку калориметра. Повышение температуры D_2O в калориметре измеряется дифференциальной хромель-алюмелевой термопарой, установленной в измерительных гильзах. Эта термопара используется также для измерения температуры воды, поступающей в калориметр.

Для определения расхода жидкости использован калориметрический метод, сущность которого состоит в следующем. В схему циркуляции включается адиабатический калориметр, в который D_2O подается при температуре, близкой к комнатной. Так как теплоемкость D_2O при этой температуре достаточно хорошо известна, а влияние давления на теплоемкость мало и может быть учтено, то расход D_2O может быть определен измерением количества тепла, подведенного к воде в калориметре, и соответствующего повышения температуры воды в калориметре. Калориметр-расходомер устроен так же, как и измерительный калориметр. Чтобы свести к минимуму теплообмен калориметра с окружающей средой, последний был покрыт изоляцией и помещен в сосуд Дюара. Повышение температуры воды в расходомере измерялось пятиспайной хромель-алюмелевой термопарой. Для определения расхода воды использовались надежные экспериментальные данные по теплоемкости D_2O при атмосферном давлении в интервале температур 10—50°С [3]. Влияние давления (0,4% при 20°С и 100 кг/см²) учитывалось по данным для H_2O . Давление измерялось образцовым пружинным манометром класса 0,2.

Проведению основных опытов предшествовала работа по градуировке дифференциальных термопар (по эталонному платиновому термометру сопротивления), тепломеров расходомера и измерительного калориметра. Наладка и проверка надежности уста-

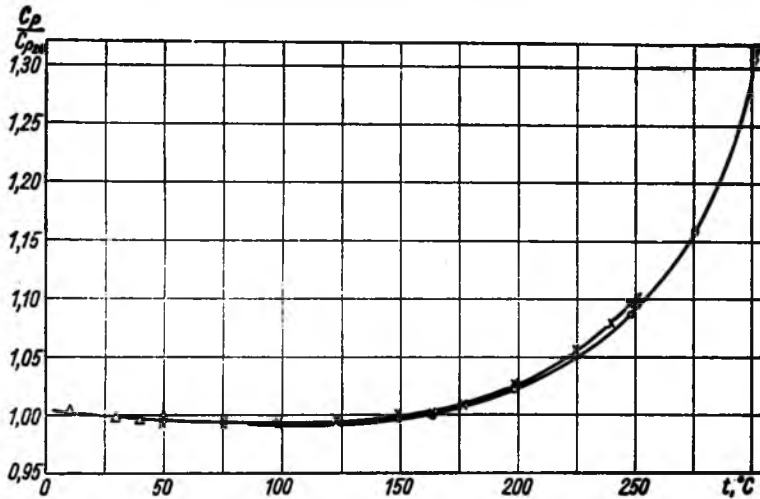


Рис. 2. Экспериментальные данные по теплоемкости D_2O :
 $\times$ — данные настоящей работы (для 50 кг/см^2); $\circ$ — данные настоящей работы (для 100 кг/см^2); Δ — данные работы [3] (для 1 кг/см^2).

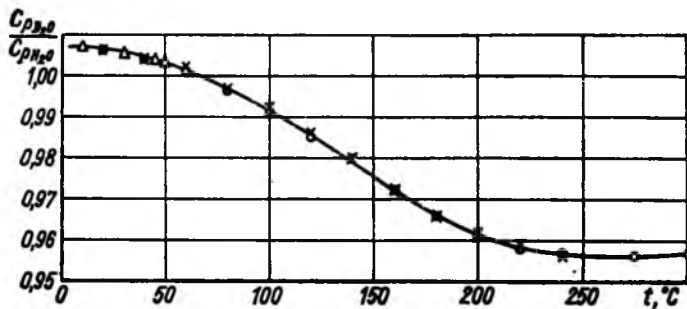


Рис. 3. Отношение теплоемкостей D_2O и H_2O .

новки проводились в опытах на H_2O , физические свойства которой исследованы в широком интервале давлений и температур с высокой степенью точности. Измеренные нами значения теплоемкости H_2O при температурах от 60 до 250°C и давлении 50 кг/см^2 согласуются с данными работы [4] с точностью до $0,2\text{--}0,3\%$. Теплоемкость D_2O была исследована на изобарах 50 и 100 кг/см^2 и температурах от 50°C до температур, близкой к насыщению при соответствующем давлении.

Температура D_2O , поступающей в измерительный калориметр, поддерживалась постоянной с точностью $0,01\text{--}0,02^\circ \text{C}$. Разность температур на входе и выходе калориметра составляла от 4 до 8°C , количество тепла, выделяемого нагревателем измерительного калориметра, — от 40 до 70 ккал/ч , а поправка на теплообмен измерительного калориметра с окружающей средой — от $0,01$ до $0,1 \text{ ккал/ч}$. Расход D_2O через калориметр равнялся $\sim 8 \text{ кг/ч}$.

При обработке экспериментальных данных вычислялось отношение теплоемкости D_2O при средней температуре в измерительном калориметре и заданном давлении к теплоемкости D_2O при средней тем-

пературе в расходомере и том же давлении:

$$\frac{(C_p)_{p, t}}{(C_p)_{p, t_p}} = \frac{(Q_u + q_u) \Delta t_p}{(Q_p + q_p) \Delta t_u},$$

где Q_u и Q_p — соответственно количества тепла, выделяемого нагревателями калориметра и расходомера; q_u и q_p — поправки на теплообмен калориметров с окружающей средой (определяются по показаниям тепломеров); Δt_u и Δt_p — разность температур между входной и выходной гильзами калориметра. Указанное отношение затем приводилось к теплоемкости D_2O при 20°C путем внесения поправки (не более $0,2\%$) по данным работы [3] на отклонение средней температуры воды в расходомере от 20°C .

На рис. 2 приведены результаты опытов. Из рисунка видно, что разброс опытных точек относительно сглаживающих кривых не превосходит $0,2\%$.

Исходя из опытных данных работы [3] и принимая, что влияние давления на теплоемкость для D_2O при 20°C такое же, как и для H_2O ($0,2\%$ на 50 кг/см^2), мы вычислили истинную теплоемкость D_2O (таблица). Затем были определены отношения теплоемкостей D_2O и H_2O для давлений 50 и 100 кг/см^2 в зависимости от температуры (рис. 3).

Отношение C_{pD_2O}/C_{pH_2O} оказалось не зависящим от давления (в исследованном интервале). Это отношение уменьшается с ростом температуры от $1,006$ при 20°C до $0,956$ при 250°C и вблизи последней температуры достигает минимума (или остается почти постоянным до 300°C).

Отношение $\frac{C_{pD_2O}}{C_{pH_2O}}$ и значения истинной теплоемкости D_2O

$t, ^\circ \text{C}$	$\frac{C_{pD_2O}}{C_{pH_2O}}$	C_{pD_2O} при 50 кг/см^2	C_{pD_2O} при 100 кг/см^2
20	1,006	1,002	1,000
40	1,004	0,998	0,996
60	1,002	0,996	0,993
80	0,997	0,996	0,995
100	0,992	0,995	0,992
120	0,986	0,996	0,992
140	0,980	0,993	0,994
160	0,972	1,004	1,000
180	0,966	1,014	1,008
200	0,962	1,030	1,023
220	0,958	1,051	1,043
240	0,957	1,083	1,073
260	0,957	1,130	1,116
280	0,957	—	1,178
300	0,958	—	1,294

Рис. 3 может быть использован для вычисления теплоемкости D_2O по данным для теплоемкости H_2O . Анализ показал, что максимальная погрешность наших измерений теплоемкости не превышает 0,8%.

На рис. 2 приведено сравнение результатов наших исследований с данными работ [3] (10—50°C). Из рисунка видно, что температурный ход теплоемкости по данным [3] очень хорошо согласуется с выявленным нами температурным ходом.

Значения теплоемкостей, определенные в работе [5], при температурах 10—125°C меньше наших значений теплоемкости. Расхождение достигает 1—1,2%.

Поступило в Редакцию 19/XII 1958 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Л. Тимрот, Н. Б. Варгафтик, С. Л. Ривкин. Изв. Всес. теплотехн. ин-та, № 4, 1 (1948).
2. А. М. Сирота, Д. Л. Тимрот. Теплоэнергетика, № 7, 16 (1956).
3. A. Cocket, A. Ferguson. Philos. Mag., 29, 185 (1940).
4. W. Koch. Forsch. Geb. Ingenieurwesens, A, 5, 138 (1934).
5. A. Eucken. Aktuelle probleme der Physikalische Chemie, Akademie-Verlag. Berlin, 1953.

Экспериментальное исследование теплопроводности тяжелой воды

Н. Б. Варгафтик, О. Н. Олещук, П. Е. Белякова

Теплопроводность тяжелой воды до сих пор была изучена для весьма узкого интервала температур. В работе [1] впервые были получены опытные данные по теплопроводности D_2O для диапазона температур 10—60°C. В работе [2] были приведены результаты измерений теплопроводности при температурах от 2°C (переохлажденная жидкость) до 80°C. Опыты показали, что теплопроводность D_2O растет с увеличением температуры, причем этот рост слабее, чем рост теплопроводности H_2O . Цель настоящей работы — исследовать теплопроводность D_2O в широком диапазоне температур до температуры, близкой к критической. Эти данные необходимы для теплового расчета ядерных реакторов, использующих D_2O .

Для измерений коэффициента теплопроводности λ был применен метод нагретой проволоки, который ранее использовался для относительных измерений [3]. В настоящей работе этот метод применен для абсолютных измерений. Основным элементом экспериментальной установки является кварцевая экспериментальная трубка (рис. 1), которая помещается в автоклав, изготовленный из нержавеющей стали. По оси трубки натянута тонкая платиновая проволока, служащая одновременно нагревателем и термометром сопротивления. Измерительная трубка, так же как и полость автоклава, заполняется исследуемой жидкостью. Поток тепла от нагревателя через исследуемую жидкость направляется радиально к стенке трубки. На наружной поверхности трубки намотан платиновый термометр сопротивления. При помощи охранных нагревателей на длине измерительного участка обеспечивались изотермические условия в автоклаве. Все провода от измерительной трубки, находящиеся внутри автоклава, были изолированы друг от друга кварцевыми капиллярами, что обеспечивало их хорошую электрическую изоляцию. С целью исключения конвективных потоков тепла толщина слоя δ исследуемой жидкости была предусмотрена достаточно малой. Внутренний диаметр трубки $D = 1,044$ мм, диаметр платиновой проволоки $d = 0,096$ мм, $\delta = 0,474$ мм. Длина измеритель-

ного участка (расстояние между потенциальными проводниками) $l = 79$ мм. Наружный диаметр трубки равен 2,35 мм. Центрировка платинового нагревателя внутри измерительной трубки обеспечивалась короткими кварцевыми капиллярами, которые располагались вне измерительного участка. Проверка центрировки производилась на специальной оптической скамье с применением микроскопов. Средняя величина эксцентриситета платинового нагревателя составляла 0,02 мм. Расчеты показали, что если для определения λ воспользоваться формулой для коаксиальных цилиндров

$$\lambda = \frac{Q \ln \frac{D}{d}}{2\pi l \Delta t}$$

и не учитывать наличия этого эксцентриситета, то ошибка в величине λ составит только 0,07%.

В связи с тем, что электропроводность воды растет с увеличением температуры, необходимо было выяснить, не внесет ли это искажения в результаты измерений, поскольку нагреватель и термометр сопротивления на стенке трубки расположены в исследуемой жидкости. Для выяснения этого вопроса были проведены измерения λ для воды с различной электропроводностью (путем растворения в ней NaCl). Опыты проводились при 20°C. Полученные в этих опытах значения λ природной воды различной электропроводности, вплоть до $6 \cdot 10^{-4}$ ом⁻¹.см⁻¹ (это значение соответствует электропроводности воды при $t \approx 360^\circ$ C), практически, в пределах 0,5%, совпали со значениями λ для дистиллированной воды. Таким образом, эти опыты показали, что конструкция данной установки, основанная на методе нагретой проволоки, вполне пригодна (с точки зрения электропроводности) для измерений λ воды до температуры, близкой к критической, во всяком случае до $t \approx 360^\circ$ C.

Для исследований была взята D_2O без всяких примесей. Заполнение установки обезгаженной D_2O производилось под вакуумом. Все электрические измерения производились потенциометром ППТВ-1.