

Людмила Петровна СЕМИХИНА —  
профессор кафедры механики многофазных систем,  
доктор физико-математических наук

Ольга Владимировна МОХОВА —  
аспирант кафедры механики многофазных систем  
Тюменский государственный университет

УДК: 536.2

## ОСОБЕННОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА В ВОДЕ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЛЕЯ

**АННОТАЦИЯ.** Импульсным методом проведено исследование коэффициентов температуропроводности  $\chi$  воды при температурах  $T < 10^\circ\text{C}$ . Обнаружено, что при числах Релея  $Ra < 300$  значения  $\chi$  воды оказываются больше общеизвестных табличных данных, а их температурная зависимость претерпевает изменение при  $4^\circ\text{C}$ , соответствующей максимуму плотности воды.

The thermal diffusivity  $\chi$  of water at temperatures  $T < 10^\circ\text{C}$  were investigated by impulse method. It was revealed, that at numbers  $Ra < 300$  numerical values of the water thermal diffusivity appear more, than their well-known handbook values, and their temperature dependence undergoes change at  $4^\circ\text{C}$ , at which the maximum of water density is observed.

Вода является наиболее распространенным теплоносителем, поэтому значения коэффициентов ее теплопроводности  $\lambda$  при различных температурах утверждались международной ассоциацией [1-2]. Необходимость такого утверждения была обусловлена не только практической значимостью этих значений, но и их аномальностью: при повышении температуры  $T$  значения  $\lambda$  воды увеличиваются, а для большинства веществ, наоборот, уменьшаются. Кроме воды рост  $\lambda$  наблюдается у глицерина и этиленгликоля — высокополярных ассоциированных жидкостей с несколькими гидроксильными группами — рис. 1 (А) [1-4].

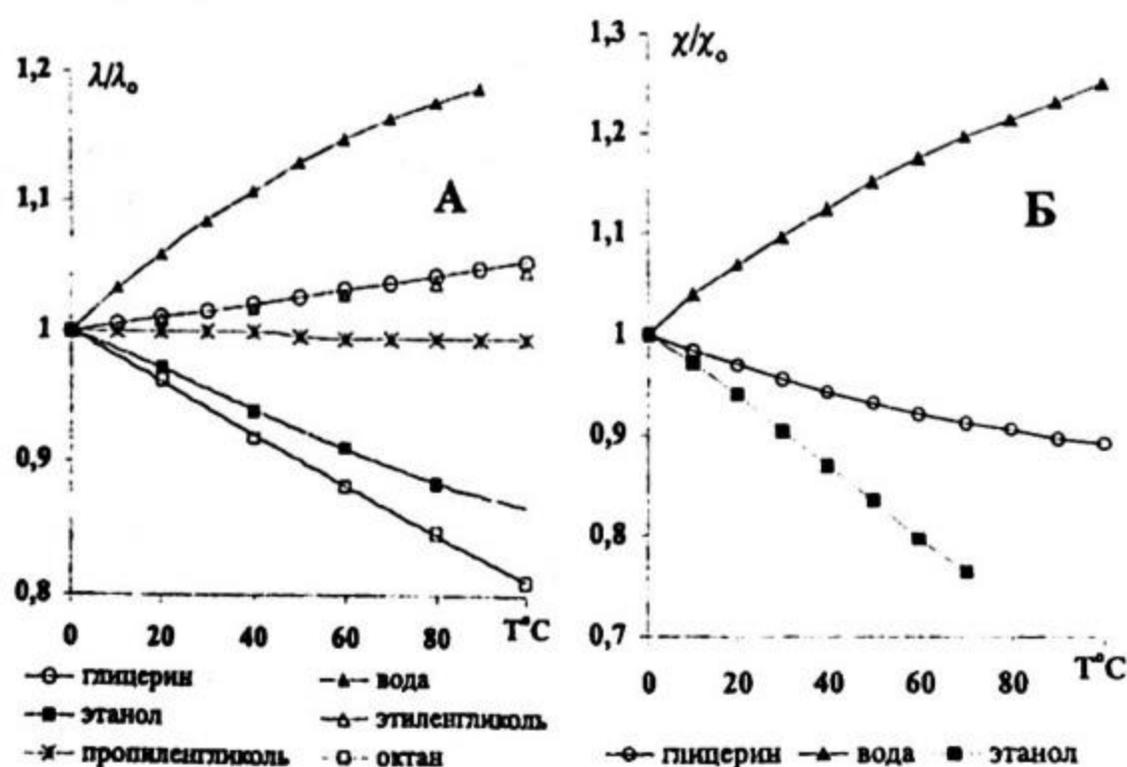


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  (А) и коэффициентов температуропроводности  $\chi$  (Б) воды при давлении 1 атм [1-6], нормированные на значения  $\lambda_0$  и  $\chi_0$  при  $0^\circ\text{C}$ , в сравнении с аналогичными данными для других жидкостей

Однако в наибольшей степени аномальность переноса тепла в воде проявляется по температурной зависимости не  $\lambda$ , а коэффициента температуропроводности  $\chi = \lambda / \rho c_p$  ( $\rho$  — плотность,  $c_p$  — удельная теплоемкость воды при постоянном давлении) [6]. Рост значений  $\chi$  при повышении температуры наблюдается только у воды, у всех других жидкостей, даже таких, как глицерин, значения  $\chi$  уменьшаются — рис. 1 (Б).

Аномальность процесса переноса тепла в воде заключается в принципиальном отличии температурной зависимости  $\lambda$  и  $\chi$  от других коэффициентов процессов переноса в воде. Дело в том, что зависимость от температуры коэффициента диффузии  $D$ , динамической вязкости  $\eta$ , удельной электропроводности  $\alpha$  и времени диэлектрической релаксации  $\tau$  в воде и других жидкостях описывается подобными соотношениями:

$$D = A_D \exp(-E/RT); \eta = A_\eta \exp(E/RT); \alpha = A_\alpha \exp(-E/RT); \tau = \tau_0 \exp(E/RT) \quad (1)$$

Справедливость соотношений (1) доказывается линейной зависимостью логарифма  $D$ ,  $\eta$ ,  $\alpha$  или  $\tau$  от  $(1/T)$ , угол наклона которой определяет энергию активации  $E$  каждого процесса. При этом общность всех явлений переноса, *кроме переноса тепла*, проявляется в равенстве их энергий активации  $E$ , значения которой в воде близки к энергии водородной связи в ней. Наличие перегиба при  $T \sim 40^\circ\text{C}$  на представленных на рис. 2 линейных зависимостях обусловлено перестройкой структуры воды и изменением по этой причине энергии активации всех процессов переноса при данной температуре (отметим, что при этой температуре в воде наблюдается аномальное поведение и других свойств воды, например, минимум теплоемкости, минимум сжимаемости). Однако во всем температурном диапазоне существования воды при нормальном атмосферном давлении ( $0^\circ\text{C} \div 100^\circ\text{C}$ ) энергия активации  $\lambda$  и  $\chi$  оказывается почти на порядок меньше, чем для остальных явлений переноса — рис. 2.

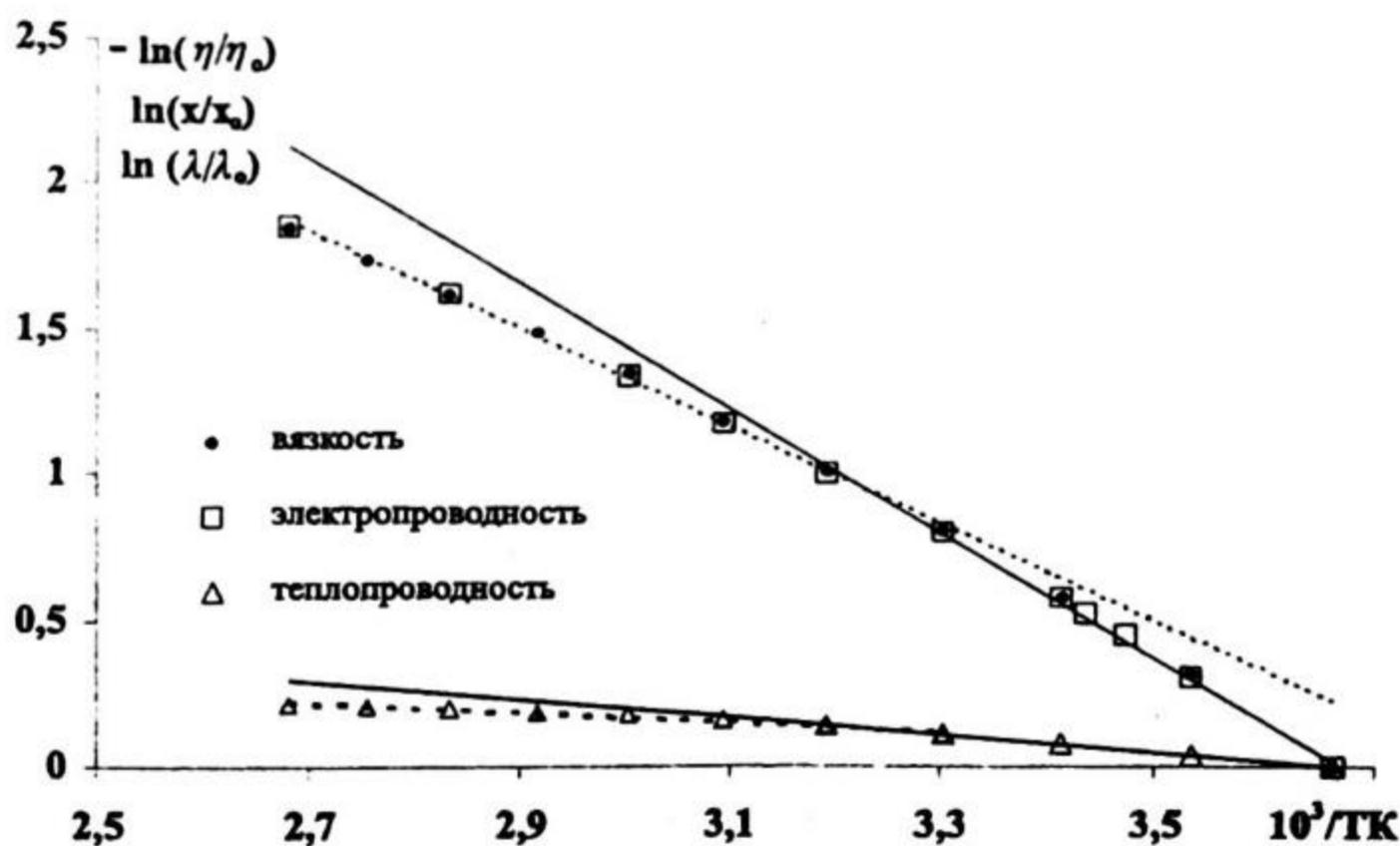


Рис. 2. Сопоставление температурных зависимостей коэффициентов переноса в воде — коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , динамической вязкости  $\eta$  и удельной электропроводности  $\alpha$  [3-4]

В отличие от других аномальных свойств воды (например, плотности, сжимаемости, теплоемкости) в литературе отсутствует анализ причин продемонстрированного на рис. 2 эффекта, его изучение было начато в работах [7-9].

В данной работе с целью выяснения природы аномальности процесса переноса тепла в воде было предпринято изучение температурной зависимости  $\chi(T)$  воды с помощью разработанного в [10-11] импульсного метода. Особое внимание уделено температурам вблизи  $0^\circ\text{C}$ . Такой выбор температур позволял исследовать влияние структурного фактора на величину  $\chi$  воды, роль которого при этих температурах максимальна, а также выявить эффект от изменения знака коэффициента сжимаемости  $\beta$  воды при  $T < 4^\circ\text{C}$  на возникновение конвективного теплообмена в вертикальном цилиндрическом слое воды.

Импульсный метод исследования  $\chi(T)$  воды был выбран в связи с возможностью измерения этим методом непосредственно значений  $\chi$ , т.к., согласно рис. 1, по величине  $\chi$  особенность явления теплообмена в воде проявляется в наибольшей степени. Этот метод позволяет с достаточной точностью определять значения  $\chi$  при малых разностях температур  $\Delta T$  в слое жидкости толщиной  $d$  и, соответственно, малых значениях чисел Релея  $Ra$

$$Ra = \frac{\beta \cdot \Delta T \cdot g \cdot d^3}{\nu \chi} \quad (2)$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости,  $g$  — ускорение свободного падения.

Методика импульсного метода подробно описана в [10-11]. В данном методе исследуемая жидкость находится в пространстве между двумя вертикаль-

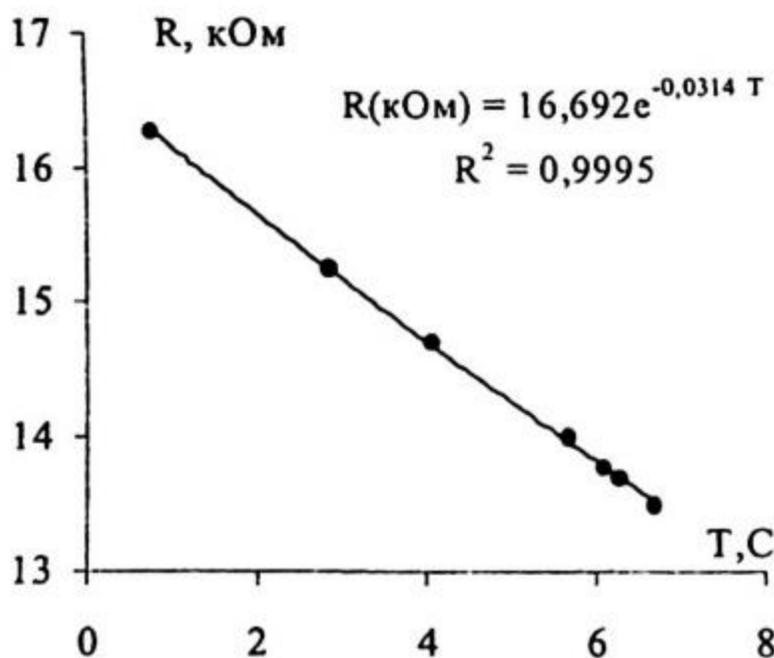


Рис. 3. Пример зависимости  $R(T)$  одного из используемых термисторов и ее компьютерная аппроксимация

компьютерной аппроксимации  $R(T)$  для одного из термисторов, достоверность которой  $R^2=0,9995$ .

Проведенные оценки точности определения разности температур  $\Delta T$  показали, что с использованным в данной работе оборудованием она составляет  $\pm 4 \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}$ . Точность определения значений  $\chi$  с помощью импульсного метода демонстрирует рис. 4, на котором показаны результаты трех последовательных экспериментов по исследованию зависимости  $\chi$  воды при температуре  $5,5^\circ\text{C} \pm 0,3^\circ\text{C}$  от величины температурного импульса  $\Delta T$ , подаваемого на вертикальный цилиндрический слой воды толщиной 5,7 мм. Отличие значений  $\chi$  воды в трех опытах не превышает 2% экспериментальной погрешности,

ными коаксиальными цилиндрами. Суть метода сводится к измерению температуры внутренней поверхности слоя жидкости после подачи на его наружную поверхность кратковременного теплового импульса, величина которого задается напряжением, подаваемым на находящийся на этой поверхности нагреватель. В данной работе была уточнена методика расчета разности температур  $\Delta T$  в слое жидкости с помощью термисторов. Применяемая ранее линейная аппроксимация температурной зависимости сопротивления термисторов  $R(T)$ , справедливая в узком диапазоне температур, была заменена степенной. На рис. 3 приведен пример

типичной для определения  $\chi$  или  $\lambda$  другими описанными в литературе методами. Достоинством импульсного метода является возможность определения с указанной 2% погрешностью значений  $\chi$  воды вплоть до  $\Delta T \sim 0,05^\circ\text{C}$ .

На достаточно высокую точность использованного метода указывает и то, что при каждой исследованной температуре (кроме  $\Delta T \sim 0^\circ\text{C}$ ) с табличным значением  $\chi_0$  воды практически совпадает найденное минимальное значение  $\chi_{\min}$ , которое наблюдается при температурном импульсе, создающем в слое воды разность температур  $\Delta T^* \sim 0,5^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C}$ . Данной разности температур соответствует градиент температур в слое воды

$$\Delta T/d \approx (0,1 - 0,2)^\circ\text{C}/\text{мм} = (1 - 2)^\circ\text{C}/\text{см} \text{ и число Релея } Ra \sim 300.$$

При  $\Delta T < \Delta T^*$  и  $\Delta T > \Delta T^*$  ( $Ra < 300$  и  $Ra > 300$ ) происходит повышение  $\chi$  воды по сравнению с ее табличным значением — рис. 4 и рис. 5 (кривая 2).

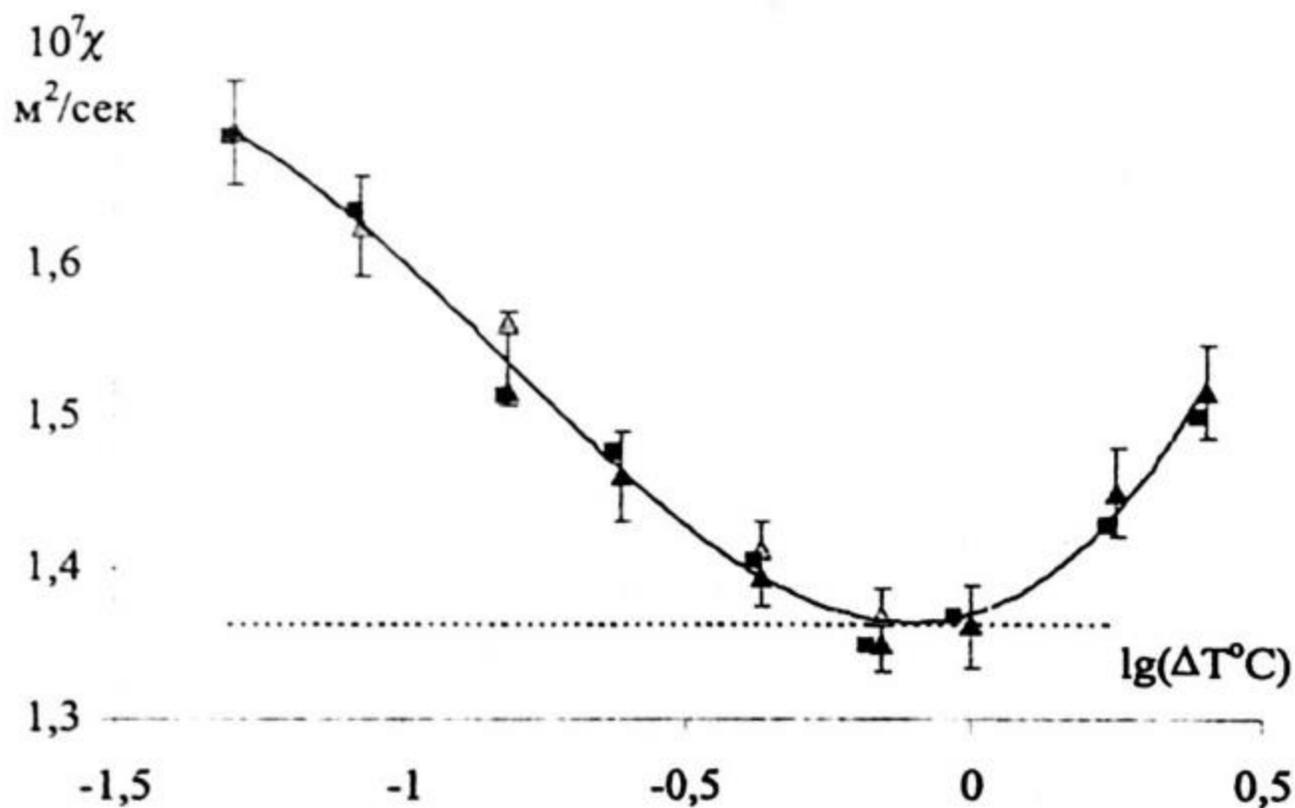


Рис. 4. Зависимость  $\chi$  воды при  $T = 5,5^\circ\text{C} \pm 0,3^\circ\text{C}$  от величины температурного импульса  $\Delta T$ , подаваемого на вертикальный цилиндрический слой воды. Отмечен уровень 2% экспериментальной погрешности. Пунктир — табличное значение  $\chi_0$  воды при  $T = 5,5^\circ\text{C}$

Причина повышения  $\chi$  воды при  $\Delta T > \Delta T^*$  хорошо известна — данный эффект обусловлен возникновением в жидкости конвективных потоков. Возможность повышения  $\chi$  воды при малых разностях температур в ее слое впервые была замечена лишь в наших работах [8-9, 11].

Представленный на рис. 4 вид зависимости  $\chi(\Delta T)$  для исследованного слоя воды является характерным, что подтверждает приведенная на рис. 5 кривая 2, полученная при другой, более высокой температуре ( $8,5^\circ\text{C}$ ). Принципиально иная зависимость  $\chi(\Delta T)$  была выявлена лишь при  $T = 0,5^\circ\text{C}$ , близкой к температуре кристаллизации воды — кривая 1 на рис. 5. Достаточно очевидно, что отсутствие на кривой 1 рис. 5 повышения  $\chi$  при  $\Delta T > \Delta T^*$  обусловлено отсутствием конвективного теплообмена вследствие того, что при  $T < 4^\circ\text{C}$  значения коэффициента объемного расширения  $\beta$  у воды отрицательны, т.е.  $\beta < 0$ . Нетривиальным является лишь следующий обнаруженный эффект: при тех значениях  $\Delta T$  в слое воды, при которых при других температурах начинается повышение  $\chi$  за счет явления конвекции, при  $T = 0,5^\circ\text{C}$  величина  $\chi$  продолжает снижаться. Предполагается, что наблюдаемое изменение  $\chi$  обусловлено увеличением амплитуды тепло-

вых колебаний молекул и искажением за счет этого сетки водородных связей между молекулами воды. Не исключено, что данный эффект происходит и при более высоких температурах, но в этом случае он нивелируется повышением  $\chi$  за счет явления конвекции. Дальнейшее изучение выявленного эффекта представляет несомненный интерес.

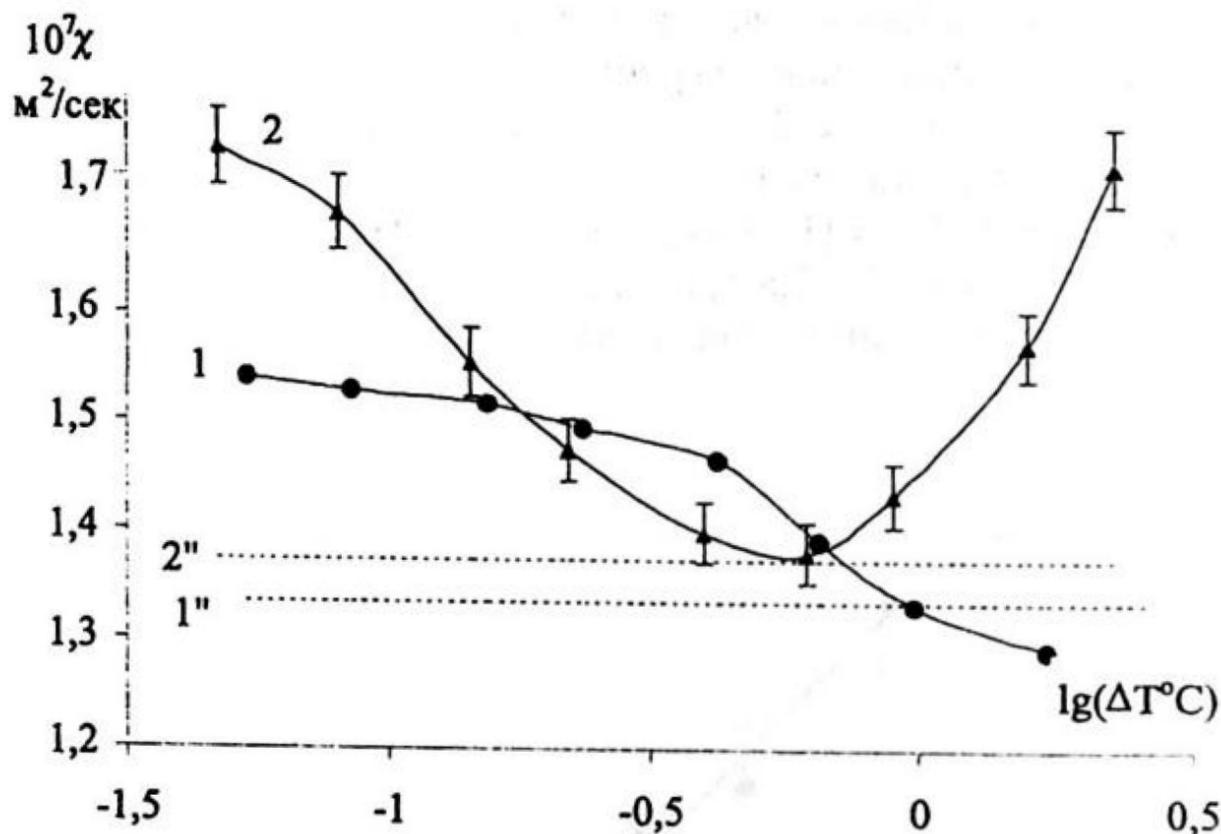


Рис. 5. Зависимость  $\chi$  воды при температуре  $0,5^\circ\text{C}$  (1) и  $8,5^\circ\text{C}$  (2) от величины температурного импульса  $\Delta T$ , создаваемого в вертикальном цилиндрическом слое воды. Отмечен уровень 2% экспериментальной погрешности.

Пунктир — табличные значения  $\chi_0$  воды при  $T=0,5^\circ\text{C}$  (1') и  $T=8,5^\circ\text{C}$  (2'')

С целью выяснения природы повышения  $\chi$  воды при малых значениях  $\Delta T$  в ее слое рассмотрим прежде всего сопоставленные на рис. 6 температурные зависимости значений  $\chi_{\max}$  и  $\chi_{\min}$  воды при  $T=0^\circ\text{C} \div 10^\circ\text{C}$ . Значения  $\chi_{\max}$  характеризуют процесс переноса тепла в воде при малых разностях температур  $\Delta T \sim 0,05^\circ\text{C}$  в ее слоях — как минимум на порядок меньше значений  $\Delta T$ , соответствующих условию возникновения конвективных потоков в исследуемых слоях. В свою очередь, согласно рис. 4 и 5, значения  $\chi_{\min} = \chi_0$  воды измеряются при таких разностях температур ( $\Delta T^* \sim 1^\circ\text{C}$ ), которые уже пренебрежимо мало отличаются от критерия возникновения конвекции в данных слоях.

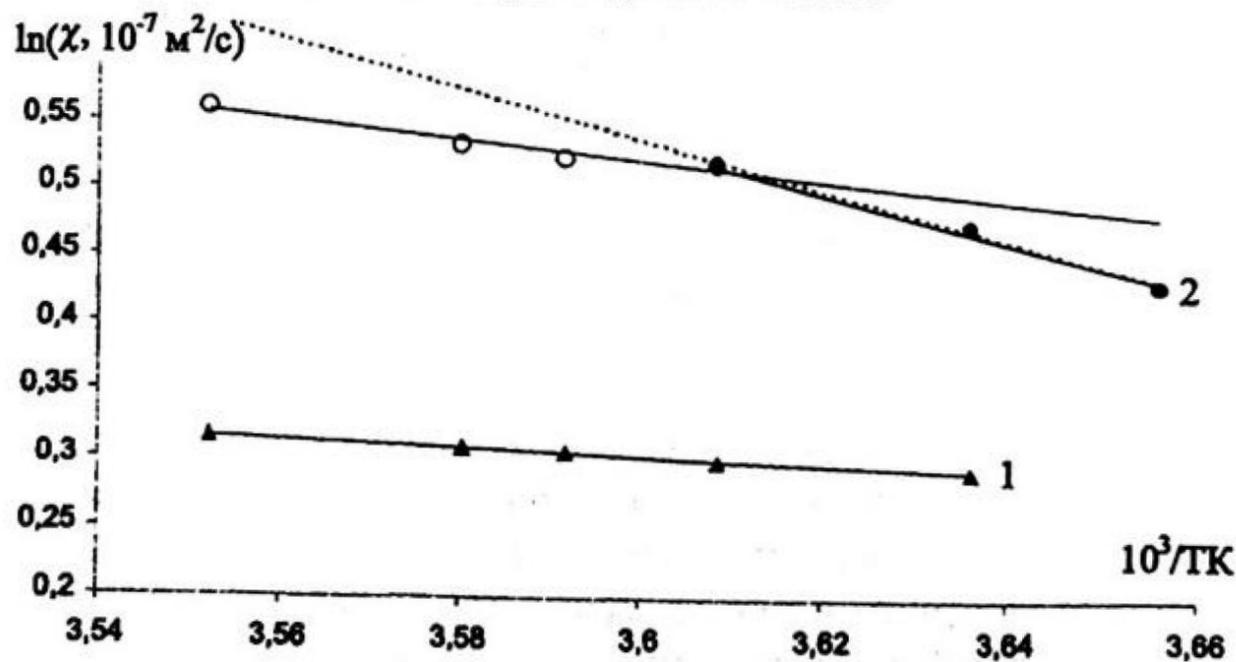


Рис. 6. Температурные зависимости значений: 1 —  $\chi_{\min}$ , равные табличным значениям  $\chi_0$  воды; 2 —  $\chi_{\max}$  воды при  $\Delta T \sim 0,05^\circ\text{C}$  в диапазоне температур  $0^\circ\text{C} \div 10^\circ\text{C}$

На рис. 6 хорошо видно, что в диапазоне температур  $T=0^{\circ}\text{C} \div 10^{\circ}\text{C}$  температурная зависимость  $\ln \chi_{\max}$  от  $1/T$ , в отличие от  $\chi_0$ , представляется не одной, а двумя прямыми с различным наклоном. Причем изменение угла наклона наблюдается при  $T=4^{\circ}\text{C}$ , при которой вода аномальна из-за наличия максимума плотности. В большинстве работ данный максимум, не наблюдающийся ни при какой температуре у всех других известных жидкостей, объясняют наличием в воде при  $T \leq 4^{\circ}\text{C}$  ажурной «льдоподобной» сетки водородных связей и ее трансформацией при более высокой температуре, хотя дискуссии об его природе ведутся до сих пор.

Согласно рис. 6, эта хорошо известная и широко дискутируемая особенность в состоянии воды при  $T=4^{\circ}\text{C}$  никак не проявляется на температурной зависимости  $\chi_{\min} = \chi_0$  воды, но весьма существенно сказывается на зависимости  $\chi_{\max}(T)$ . Вероятной причиной наличия перегиба на зависимости  $\ln \chi_{\max}$  от  $1/T$  на рис. 6 является изменение энергии активации  $E$  переноса тепла в воде из-за изменения ее структуры.

Линейность представленных на рис. 6 зависимостей  $\ln \chi$  от  $1/T$  указывает на возможность представления этих зависимостей выражением, подобным соотношениям (1):

$$\chi = A \exp(E_{\chi} / RT) \quad (3)$$

Тогда рассчитанные по представленным на рис. 6 зависимостям значения энергий активаций  $E$  в исследованном диапазоне температур  $0^{\circ}\text{C} < T < 10^{\circ}\text{C}$  оказываются равными:

$$\begin{aligned} E_{\chi_{\min}} &= E_{\chi_0} = 2,4 \text{ кДж/моль}; \\ E_{\chi_{\max}} &= 15,4 \text{ кДж/моль при } T \leq 4^{\circ}\text{C}, \\ E_{\chi_{\max}} &= 5,9 \text{ кДж/моль при } T < 4^{\circ}\text{C}. \end{aligned}$$

Для сравнения приведем значения энергии активации вязкости  $E_{\eta}$  и электропроводности  $E_{\sigma}$ , близкие к энергии водородных связей в ней (рис. 1):

$$\begin{aligned} \text{при } T < 40^{\circ}\text{C} & \quad E_{\sigma} = E_{\eta} = 17,8 \text{ кДж/моль}, \\ \text{при } T > 40^{\circ}\text{C} & \quad E_{\sigma} = E_{\eta} = 13,5 \text{ кДж/моль}. \end{aligned}$$

В результате находим, что значение  $E_{\chi_{\min}} = E_{\chi_0}$  в 7,5 раз меньше  $E_{\sigma} = E_{\eta}$  и энергии водородных связей в воде, в то время как  $E_{\chi_{\max}}$  при  $T \leq 4^{\circ}\text{C}$  отличается от данных энергий уже только на 16%.

Для того, чтобы более конкретно установить суть изменения процесса теплопроводности воде при малых и предшествующих началу конвекции градиентах температур в ее слоях, в уравнение (3) подставим найденное в [7] выражение для постоянной  $A$ :

$$\chi = \bar{v} \bar{\delta} \exp(-E_{\chi} / RT) = (3 \bar{\delta} \sqrt{RT/M} / 2) \exp(-E_{\chi} / RT) \quad (4)$$

где  $\bar{\delta}$  — среднее расстояние, на которое должна переместиться молекула воды или ее ассоциаты для обмена энергией.

Для нахождения  $E_{\chi}$  и  $\bar{\delta}$  уравнение (4) представим в виде

$$Y = \ln(2\chi \sqrt{M/RT} / 3) = \ln \bar{\delta} - E_{\chi} / RT \quad (5)$$

Зависимость  $Y = \ln(2\chi \sqrt{M/RT} / 3)$  от  $1/T$  для табличных значений  $\chi_0$  воды в интервале температур  $0^{\circ}\text{C} \div 100^{\circ}\text{C}$  представлена на рис. 7.

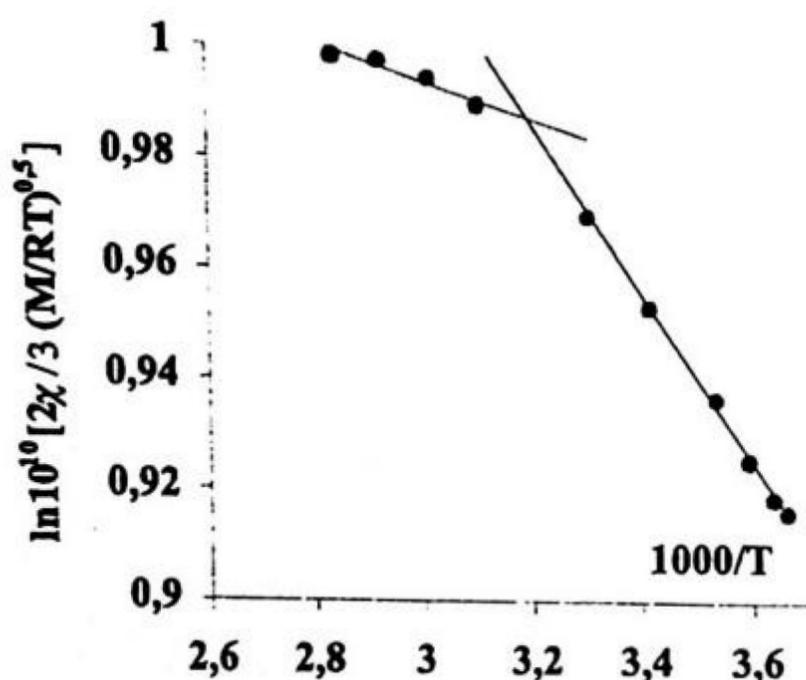


Рис. 7. Зависимость  $Y$  от  $1/T$  для значений  $\chi_0$  жидкой воды при  $p=1$  атм [7]

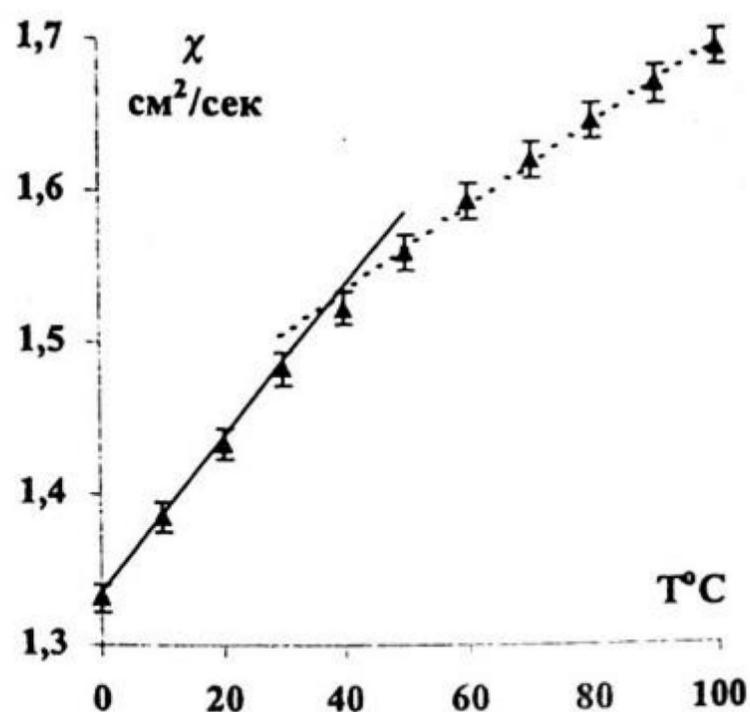


Рис. 8. Температурная зависимость  $\chi$  воды: точки — данные из [1], линии — расчет по (4). Вертикальными линиями отмечен уровень 0,7% погрешности

Как видим, эта зависимость представляется в виде двух прямых, по уравнениям которых находятся значения  $E_{\chi_0}$  и  $\bar{\delta}$ :

$$\text{при } T < 40^\circ\text{C} \quad E'_{\chi_0} = (1,29 \pm 0,01) \text{ кДж/моль}, \quad \bar{\delta} = (0,442 \pm 0,005) \text{ нм} \quad (6)$$

$$\text{при } T \geq 40^\circ\text{C} \quad E''_{\chi_0} = (0,19 \pm 0,01) \text{ Дж/моль}, \quad \bar{\delta} = (0,287 \pm 0,005) \text{ нм} \quad (7)$$

Температурная зависимость  $\chi_0$  воды с найденными для нее параметрами  $E_{\chi_0}$  и  $\bar{\delta}$  показана на рис. 8. При этом наличие изменения  $E_{\chi_0}$  в воде при  $T \approx 40^\circ\text{C}$  полностью согласуется с изменением при этой температуре энергии активации всех других явлений переноса. А рассчитанные значения  $\bar{\delta}'$  и  $\bar{\delta}''$  для  $\chi_0$  воды с точностью до ошибки эксперимента совпадают с  $r_1 \approx 0,282$  нм и  $r_2 \approx 0,45$  нм, при которых имеются максимумы на радиальной функции распределения жидкой воды, соответствующие взаимному расположению ее соседних молекул [7, 13]. Регистрируемое методом рентгеноструктурного анализа постепенное понижение максимума на  $r_2 \approx 0,45$  нм и его исчезновение при  $T \approx 50^\circ\text{C}$ , интерпретируемое исчезновением «льдообразной» структуры в воде, объясняет возникновение перегиба на рис. 7 из-за ажурности «льдообразной» структуры  $\bar{\delta}'_{\chi_0} > \bar{\delta}''_{\chi_0}$ .

Таким образом, величина  $\chi_0$  в воде является структурочувствительным параметром. Причем по виду  $\chi_0(T)$  и уравнению (5) можно проводить структурный анализ воды без использования дорогостоящих рентгеновских установок [7].

Для выяснения природы отличия  $\chi_0$  и  $\chi_{\text{max}}$  воды экспериментальные значения для  $\chi_{\text{max}}$  аналогично  $\chi_0$  представим в виде зависимости  $Y = \ln(2\chi \sqrt{M/RT} / 3)$  от  $1/TK$  — рис. 9. Как видим, изменение процесса теплопроводности при  $T=4^\circ\text{C}$  на данной зависимости проявляется более резко, чем на рис. 6. Найденные по представленным на рис. 9 зависимостям значения  $E_{\chi_{\text{max}}}$  и  $\bar{\delta}$  оказались равными:

$$\text{при } T < 4^\circ\text{C} \quad E'_{\chi_{\text{max}}} = (14,2 \pm 0,1) \text{ кДж/моль}, \quad \bar{\delta}'_{\chi_{\text{max}}} = (150 \pm 5) \text{ нм} \quad (8)$$

$$\text{при } T \geq 4^\circ\text{C} \quad E''_{\chi_{\text{max}}} = (4,7 \pm 0,1) \text{ Дж/моль}, \quad \bar{\delta}''_{\chi_{\text{max}}} = (2,8 \pm 0,1) \text{ нм} \quad (9)$$

Как видим, как и при расчете по упрощенному уравнению (3), значения  $E_{\chi_{\text{max}}}$  оказываются на порядок выше  $E_{\chi_0}$  и гораздо ближе к значениям энергий активаций других процессов переноса в воде. Особый интерес представляет то, что для  $\chi_{\text{max}}$  существенно больше оказываются также и значения  $\bar{\delta}$ .

Для выяснения природы ассоциатов из молекул воды, которым соответствуют найденные значения  $\bar{\delta}'\chi_{\max}$  и  $\bar{\delta}''\chi_{\max}$  учтем, прежде всего, что любая вода фактически является раствором. В частности, использованной в данной работе дистиллированной воде с удельной электропроводностью 2 мкСм/см соответствует раствор NaCl с концентрацией  $\gamma \sim 4 \cdot 10^{-6}$  моль/л [11].

А в растворах электролитов все молекулы воды в той или иной мере, оказываются в составе ионных атмосфер, за радиус  $r_i$  которых в теории электролитов обычно принимается величина Дебаевского радиуса экранирования. В случае водных растворов одно-одновалентных солей

$$r_i \approx 0,3/\sqrt{\gamma} \text{ (нм)} \quad (10)$$

где  $\gamma$  — концентрация раствора в моль/л [14, 11].

По данному соотношению, рассчитанной выше  $\gamma \sim 4 \cdot 10^{-6}$  моль/л -концентрации NaCl, эквивалентной по электропроводности использованной в данной работе дистиллированной воде, соответствует  $r_i = 150$  нм, что с точностью до ошибки эксперимента совпадает с величиной  $\bar{\delta}'\chi_{\max} = (150 \pm 5)$  нм. Таким образом, при температуре  $T < 4^\circ\text{C}$  при малых градиентах температур в слое воды теплообмен преимущественно осуществляется путем обмена энергией между ионными атмосферами. Однако это образование радиусом  $r_i = 150$  нм, состоящее примерно из  $10^8$  молекул, более или менее стабильно лишь при температурах  $T < 4^\circ\text{C}$  и разрушается даже при этой температуре под воздействием температурных импульсов с амплитудой более  $0,05^\circ\text{C}$ .

При температуре  $T \geq 4^\circ\text{C}$  ионная атмосфера как целое образование становится уже полностью нестабильной и распадается на более мелкие относительно устойчивые фрагменты (кластеры), внутри которых все молекулы воды связаны между собой водородными связями. Наиболее характерный размер этих кластеров и определяет найденное значение  $\bar{\delta}''\chi_{\max} = (2,8 \pm 0,1)$  нм.

Отметим, что в литературе имеется целый ряд попыток оценить размеры кластеров, которыми определяются различные свойства воды. При этом в большинстве случаев приходят к выводу о существовании в воде кластеров радиусом порядка 3 нм [15], что полностью согласуется с впервые найденной в данной работе величиной  $\bar{\delta}''\chi_{\max}$ .

Однако и кластеры с размером  $\bar{\delta}''\chi_{\max}$  также малостабильны. По результатам диэлектрических и масспектральных данных время жизни кластеров в воде не более 10 мкс [11] — через такое время данные кластеры разрушаются и вновь образуются. Однако при наличии направленного теплового потока через тонкий слой жидкости вероятность восстановления кластеров вдоль этого потока снижается, причем этот эффект проявляется в той большей степени, чем выше величина градиента температуры в слое воды. Согласно представленным выше данным, при градиенте температур  $\Delta T/d \approx (0,1 - 0,2)^\circ\text{C}/\text{мм} = (1 - 2)^\circ\text{C}/\text{см}$  кластеры вдоль теплового потока практически перестают восстанавливаться, и теплообмен осуществляется лишь молекулами воды с разорванными водородными связями. Поскольку усредненная по большому промежутку времени доля таких

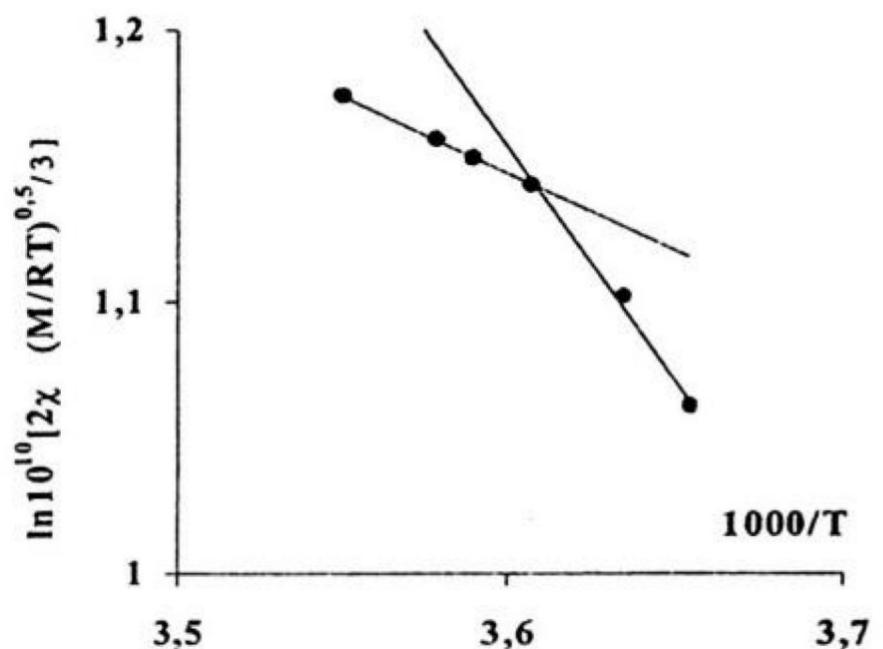


Рис. 9. Зависимость  $Y$  от  $1/T$  для значений  $\chi_{\max}$  жидкой воды

молекул в воде очень мала, то более высокое по сравнению с другими жидкостями значение  $\chi$  в ней можно объяснить лишь тем, что в процессе теплообмена участвуют молекулы, разорвавшие свои водородные связи на время порядка  $\tau \sim 10^{-10}$  сек непосредственно перед теплообменом. Перемещение такой временно свободной молекулы подобно молекулам газов, что и обуславливает газоподобный механизм теплопроводности в воде при высоких градиентах температур в ее слоях. Именно такому механизму соответствуют общеизвестные табличные значения  $\chi_0$  с энергией активации  $E_{\chi_0}$  много меньшей энергии водородных связей в воде.

В то же время механизм теплопроводности, соответствующий значениям  $\chi_{\max}$  воды, можно назвать кластерным, поскольку в этом случае обмен энергиями преимущественно происходит между кластерами воды. Благодаря высокой энергии взаимодействия у молекул воды внутри кластера полученная кластером дополнительная тепловая энергия быстро перераспределяется между всеми входящими в него молекулами. А после распада данного кластера и образования через несколько микросекунд нового, но уже из других соседних молекул, полученная энергия перераспределяется и между этими молекулами. В результате скорость теплообмена при кластерном механизме теплопроводности выше, чем при газоподобном механизме  $\chi_{\max} > \chi_0$ .

Таким образом, при малых и больших разностях температур в слое воды происходит не количественное, а качественное изменение самого механизма теплопроводности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варгафтик Н. Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Юрчак Р. П., Тоцкий Е. Е. Теплопроводность жидкостей и газов: Справ. данные. М.: ГСССД, 1970. 154 с.
2. Варгафтик Н. Б., Филиппов Л. П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е. Е. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. М.: Энергоиздат, 1990. С. 59-68.
3. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1963. 708 с.
4. Справочник химика. Т.1. 1962. 700 с.
5. Lienhard, J. A Heat Transfer Textbook. Pheogiston Press. Cambridge, Massachusetts, 2001. 705 с.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
7. Семихина Л. П., Матаев А.С. Обобщение справочных экспериментальных данных по теплопроводности воды // Теплофизика, гидродинамика, теплотехника: сб. ст. Вып. 2. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2004. С. 212-217.
8. Семихина Л.П., Матаев А.С. Теплопередача в воде и водных растворах солей при малых числах Релея. // Теплофизика, гидродинамика, теплотехника: сб. ст. Вып. 2. Тюмень: ТюмГУ, 2004. С. 39-46.
9. Шабаров А.Б., Семихина Л.П., Матаев А.С. Физико-химические особенности переноса тепла в воде и водных растворах солей. Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2004. 32 с.
10. Семихина Л.П. Исследование влияния слабых магнитных полей на физические свойства воды и льда. Дисс. ... канд. ф-м. наук. Изд-во МГУ, 1989. 167 с.
11. Семихина Л.П. Низкочастотная диэлькометрия жидкостей в слабых вихревых электрических полях. Дисс. ... д-ра ф-м. н. СПб.; 2006. 230 с.
12. Шабаров А.Б., Семихина Л.П., Матаев А.С. Измерение эффективных коэффициентов теплопроводности в слоях жидкости. Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2004. 18 с.
13. Скрышевский А.Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел. М.: Высшая школа, 1980. 360 с.
14. Дебай П. Избранные труды. Л.: Наука. 1987. С. 264- 316. (Debye, P. Falkenhagen, H. // Phys. Ztschr. 1928. V. 29. P. 121).
15. Вода: структура, состояние, сольватация. Достижения последних лет. М.: Наука, 2003.