

УДК 544.576:532.14

А.Е. Афанасьев, А.С. Ефремов**ВЗАИМОСВЯЗЬ ПЛОТНОСТИ СВЯЗАННОЙ ВОДЫ
ТОРФА С ЕЕ АНОМАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

На основе разработанного метода определения плотности связанной воды при сушке коллоидных и капиллярно-пористых тел сделана попытка качественного объяснения ее связи с аномальными свойствами свободной и связанной воды с помощью предлагаемой технологической модели, отражающей изменение концентрации кластеров и неассоциированных молекул в свободной и связанной воде в зависимости от температуры среды. Рассмотрено предложение по управлению свойствами жидкости через изменение концентрации ее элементов структуры. Показано, что одинаковая плотность свободной и связанной воды может наблюдаться при различной структуре (разной температуре), т.е. неодинаковом количестве кластеров и неассоциированных молекул. В этой связи плотность воды носит больше технологический смысл нежели физико-химический.

Ключевые слова: торф, связанная вода, аномалия, структура, технология.

Существует большое количество различных теорий и моделей, объясняющих структуру и свойства свободной воды. Причем свойства и значения плотности связанной воды встречаются довольно редко. В наших работах этот вопрос подробно рассмотрен на примере торфяных систем [1—4]. Разработан метод расчета и, впервые, получены значения плотности $\rho_{\text{ж}}$ жидкости при сушке торфа различной дисперсности и температуры T , отличающихся от табличных ρ_0 значений, для соответствующих периодов ($i = 1, 2$) структурообразования $\rho_{\text{ж}} = (0.81-1.32) \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ($i = 1, 2$). Причем для $i = 1$ $\rho_{\text{ж}} = 1.16 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, а для $i = 2$, $\rho_{\text{ж}} = 1.32 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ при $T_{\text{ж}} = 308 - 313\text{K}$, что соответствует максимуму значений в каждом из периодов структурообразования. Это обстоятельство определяется видом взаимодействия между элементами структуры (свя-

зи Ван-дер-Ваальса, $i = 1$; и Н-связи, $i = 2$) и ее подвижностью с ростом T . При $T_{\text{н}} \approx 343\text{K}$ Н-связи разрушаются и преобладает только молекулярные.

В случае переработки Z торфа в шнековом устройстве при $T_i = \text{const}$ плотность жидкости растет от $0.81 \cdot 10^3$ (без переработки, $z = 0$ раз) до $1.03 \cdot 10^3$ (с переработкой, $z = 25$ раз) в первом ($i = 1$) и с $0.92 \cdot 10^3$ до $1.2 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ — во втором ($i = 2$) периодах структурообразования. Следовательно, $\rho_{\text{ж}}$ растет с повышением дисперсности торфяных систем. Так как S_0 пропорционально степени разложения торфа, то можно предположить, что $\rho_{\text{ж}}$ в торфяных залежах естественного залегания будет уменьшаться с понижением степени разложения торфа за счет более рыхлой структуры воды из-за изменения концентрации C_i ассоциатов и снижения взаимодействия молекул воды с функциональными группами торфа [5]. Полученные значения $\rho_{\text{ж}}$ находят-

ся в соответствии с данными для глин,

$$\rho_{\text{ж}} = (0.9-2.4) \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad [6].$$

Состояние твердой фазы можно оценить и с технологических характеристик (помимо прочности R_f структуры и ее энергии связи $E(W)$) с позиции изменения $\rho_{\text{ж}} = f(n)$ (n -пористость структуры торфа). Было установлено [13], что $\rho_{\text{ж}} = f(n)$ проходит через максимум соответственно для первого ($n_{\text{max}} = 0.85$) и второго ($n_{\text{max}} = 0.53$) периодов структурообразования.

Такое изменение $\rho_{\text{ж}}$ вызвано тем, что если в свободном состоянии вода подчиняется силам тяжести, передает гидростатическое давление, мало сжимаема [7, 8], то в связанном состоянии на структуру и плотность воды влияет минералогический состав торфа, связанный с первичной (менее 15 %) и привнесенной (вторичной) золой, определяемой окислами SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 (около 80 % золы). Наличие в торфе ионов Ca , Fe , Mg , K , Na , S значительно изменяет его физико-химические и технологические свойства [9, 10].

Групповой химический состав органической части торфа (легкогидролизуемые и водорастворимые, битумы, гемицеллюлоза, гуминовые и фульво-кислоты, целлюлоза, лигнин) определяет направление переработки и использования получаемой продукции, а также физико-химические (гидрофильность, плотность, прочность) и технологические (крошимость, водопоглощение, устойчивость к внешним воздействия при хранении и сбыте продукции) свойства, проявляющиеся при структурировании связанной воды [1–4]. Последнее проявляется как на границе с воздухом, так и в торфяных пористых системах под действием поверхностных (молеку-

лярных) далекодействующих сил, создаваемых осциллирующими атомами или молекулярными диполями, а также за счет диссоциации поверхностных ионогенных групп (OH^- , COOH^- , NH_3^+ и др.) [5, 7, 11, 12]. В этой связи структурирующим фактором в капиллярно-пористом теле служит твердая фаза с ее многообразием ионов и функциональных групп, определяющих плотность прилегающих слоев воды. На плотность жидкости в порах торфа оказывают влияние также жидкие (различной плотности) и примеси механического и растительного происхождения, естественная (выделение газа в болотообразовательных процессах), при разложении кристаллогидратов в водоемах и искусственная газификация, когда пузырьки газа диспергируют ее и замешают плотную жидкость газовой средой.

Рассмотренные особенности поведения связанной жидкости в зависимости от температуры T , дисперсности S_0 , общей пористости n показывают различную степень ее физико-химической активации [1–4], что должно отразиться и на аномальных свойствах воды вследствие изменения содержания ассоциированных (кластеров) и неассоциированных молекул. Для этого воспользуемся обобщающей характеристикой — плотностью связанной и свободной воды в зависимости от температуры.

В связи с тем, что молекулярную структуру воды невозможно определить экспериментально прибегают к другим методам исследования и прежде всего к различным видам моделирования [13–14]. Поэтому целью настоящей работы является оценка аномальных свойств воды с позиции разработки технологической модели, включающей относительное измене-

ние содержания кластеров в воде при различных T , представленных в виде сферической формы частиц двух сортов: d_1 — отдельные молекулы, d_2 — кластеры. Причем $d_2 \gg d_1$. Доля (концентрация) C_i ($i = 1, 2$) частиц в общей массе меняется от 0 до 100%. Так что общее число части N_i при $T_i = \text{const}$ будет равно $N_i = N_1 + N_2$. Их доля соответственно составит: $C_1 = \frac{N_1}{N_i}$, $C_2 = \frac{N_2}{N_i}$, $C_1 + C_2 = 1.0$

Теоретический анализ

Вода встречается в различных физических состояниях в девяти устойчивых изотопных видах. В молекуле воды атомы водорода и кислорода образуют валентный угол Н-О-Н в 100.7° [13] так, что создаются диполи, которые объединяются в ассоциаты с общей формулой $(H_2O)_n$ и образуют циклическое, цепочечное и ветвистое строение (тетраэдрический ассоциат) воды с ковалентными и водородными связями. Имеется и другое деление структуры молекул воды: угловая, шаровая, тетраэдрическая [13]. В этой связи под ассоциацией необходимо понимать взаимодействие близких по природе молекул с образованием относительно неустойчивых групп-ассоциатов, в которых молекулы связаны Ван-дер-Ваальсовыми, диполь-дипольными и др. силами с переносом заряда, включая H -связь. Причем последнюю, в этом случае, принято называть кластерной, состоящей из сотен и тысяч ионов [13, 14]. Молекулы воды довольно прочны, но их небольшая часть диссоциирует: $H_2O = H^+ + OH^-$.

Свободный приток H^+ не может существовать в водной среде. Он немедленно присоединяется к молекуле воды и образует гидроксоний H_3O^+ . Объединение последнего с гидроксидом OH^- образует две молекулы воды

$2H_2O$. Есть и другие схемы образования молекул воды в воде [15]. Полностью молекула воды может распадаться на H_2 и O_2 при $T = 1773.16\text{ K}$.

Нами из двух групп смешанных моделей воды (кластерные и клатратные), положена за основу модель в виде кластеров (молекулы связаны водородными связями) и ассоциатов (со связями Ван-дер-Ваальса), находящихся в постоянном взаимодействии, как между собой, так и со структурирующей твердой фазой капиллярно-пористого тела. При этом воздействие на воду распространяется эстафетным путем на тысячи межатомных расстояний. Как правило, для объяснения экспериментальных данных используют двухструктурные модели, предполагающие одновременное присутствие в свободной воде льдоподобной и плотноупакованной структур [13, 14]. Наибольшее распространение среди кластерных моделей получила модель Г. Немети и Х. Шераги. В этом случае кластеры «как бы плавают» в море несвязанных молекул свободной воды [13], в которой влияние структурирования жидкости твердой фазой пористого тела по С.В. Зенину не учитвалось [16, 17]. Полагаем, что для объяснения максимума плотности свободной воды может подойти и кластерно-фрактальная модель воды [13].

Таким образом, для качественной оценки аномальных свойств воды используется разработанная нами технологическая модель, построенная по аналогии с механикой сплошных сред, на представлении жидкости, состоящей из двух сортов частиц. При этом в качестве обобщающего фактора используется плотность связанной воды [2, 3, 8] с учетом ее структурирования твердой фазой пористого торфа.

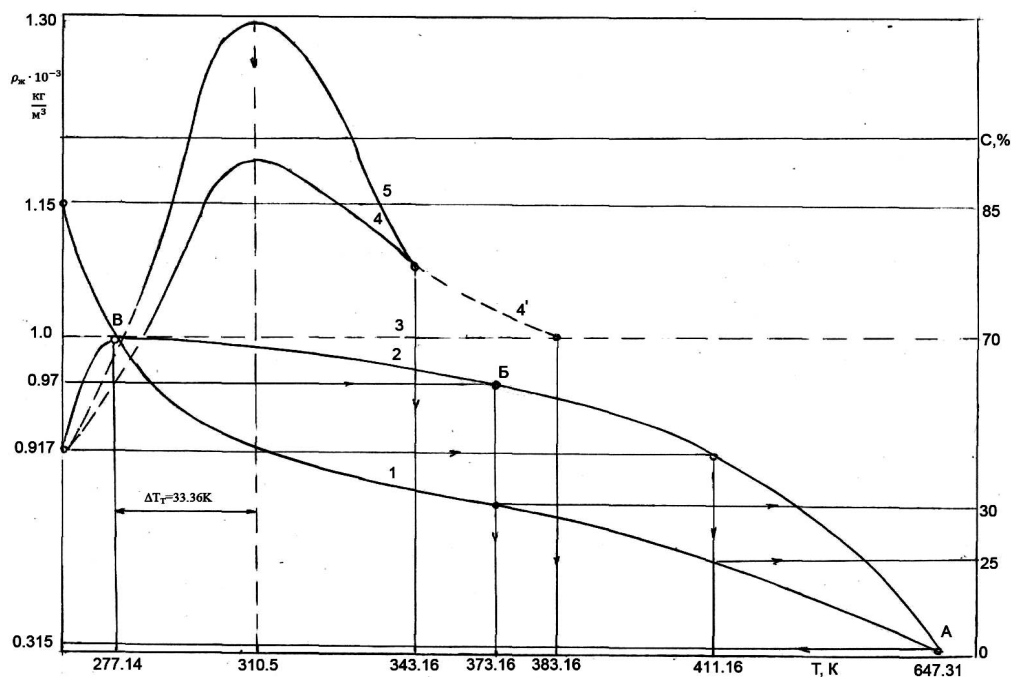


Рис. 1. Схема зависимости плотности жидкости (графики: 2, 3, 4, 4', 5) и концентрации кластеров (график 1) от температуры сушки торфа: 1, 2, 3 – свободная вода, 4, 4', 5 – связанная; 4 – первый, 5 – второй периоды структурообразования; 2 – табличные значения, 3 – $\rho_{ж} = 1 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ при $T = 277.14\text{K}$; А, Б, В, Г – характерные точки кривой $\rho_{ж} = f(T)$

лось, что R_i растет с уменьшением d_i (при $W_i = \text{const}$). Особенно R_i возросло в образцах, полученных из смеси различных по размерам сферических частиц, когда между крупными частицами размещались мелкие. Это обстоятельство позволяло повысить число связей N_i в сечении образца, а следовательно его прочность, при уменьшении числа дефектов структуры [18, 20, 21]

$$R_r = N_i \cdot P_i \cdot f_i \quad (1)$$

и плотность ρ_i , где P_i — прочность индивидуального контакта H ; N_i — число связей на единице сечения, $\frac{1}{m^2}$;

f_i — вероятность взаимодействия связи, которая для торфяных систем составляет: $f_i = 1 - n' = 0.42 - 0.46$ [20],

где $n' = \frac{\Delta N}{N_0}$ — доля не участвующих, по различным причинам, во взаимодействии элементов структуры, N_0 — максимально возможное число связей, $\Delta N = N_0 - N_i$.

Впервые этот технологический прием для торфяных систем был предложен Н.В. Чураевым [18]. Прочность (плотность) возрастает, из-за роста числа N_i контактов, при переходе от кубической к гексагональной укладке крупных частиц, что может иметь место, например, в структуре хлорида натрия (Na^+Cl^-).

Следовательно, с помощью технологической модели, учитывающей активацию воды твердой фазой торфа сделаем попытку объяснить некоторые особенности ее аномальных свойств в свободном и связанном состояниях в торфяных системах.

Результаты и их обсуждение

1. Свободная вода относится к слабым электролитам с высокой ди-

электрической проницаемостью, встречается в различных физических состояниях. Обладает дипольным моментом. Диполи соединены в ассоциаты, связи неустойчивы. Молекула воды может иметь четыре водородные связи. Особенности связей Н и О определяют структуру и свойства воды с изменением термодинамических условий [7]. Колебание соотношения концентрации кластеров C_2 и неассоциированных C_1 или слабо ассоциированных молекул в зависимости от температуры T среды, определяет плотность $\rho_{\text{ж}}$ воды.

Изменение $C(T)$ и $\rho_{\text{ж}}(T)$ (рис. 1 графики 2, 3) показывает, что при критической температуре ($T_{\text{кр}} = 647.3\text{K}$) вода приобретает однородное статистическое состояние, определяемое неассоциированными молекулами (отсутствуют кластеры, $C_2 = 0$, рис. 2, точка А). При этом плотность, исходя из технологической модели, должна быть максимальной, вследствие возможного максимального числа контактов при минимальном размере элементов (молекул) структуры. Но этого не случается ($\rho = 0.325 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$), из-за

высокой ионной подвижности, которая зависит от природы иона, его массы, температуры, диэлектрической проницаемости, вязкости и концентрации C_i элементов структуры (кластеров) [22].

С понижением температуры, число статистически распределенных кластеров растет до $C_2 \approx 30\%$ ($T = 373.16\text{K}$) [7], что способствует повышению плотности до

$$\rho_{\text{Б}} = 0.97 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (\text{рис. 1 график 1,}$$

точка Б), т.е. «рыхлость» структуры понижается. Взаимодействие осуше-

ствляется уже в неоднородной по структуре жидкости между кластерами через неассоциированные молекулы воды или непосредственно между ними с различной подвижностью элементов. Число неассоциированных молекул снижается.

При дальнейшем понижении температуры среднее статистическое значение плотности возрастает до максимума

$$(\rho_B = 1.0 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$T = 277.14 \text{ K}$, точка В), из-за продолжающегося роста числа кластеров ($C_2 \approx 70\%$), когда в их промежутках могут находиться неассоциированные молекулы. Это соотношение, как показано выше, дает максимальную плотность (прочность) структуры с понижением ее подвижности. Надо полагать, что это состояние подобно клатратно-фрактальной структуре [13].

С понижением температуры до T замерзания ($T = 273.16 \text{ K}$, точка Г) плотность уменьшается до

$$\rho_{\text{ж}} = 0.917 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \text{ снижается под-}$$

вижность системы, а в большей степени кластерной структуры. Причем, последняя должна иметь максимальное количество кластеров [15], что естественно не бывает из статистических проявлений дальних кулоновских и других взаимодействий между ними и частично оставшимися не ассоциированными молекулами [23]. В работе [13] показано, что при плав-

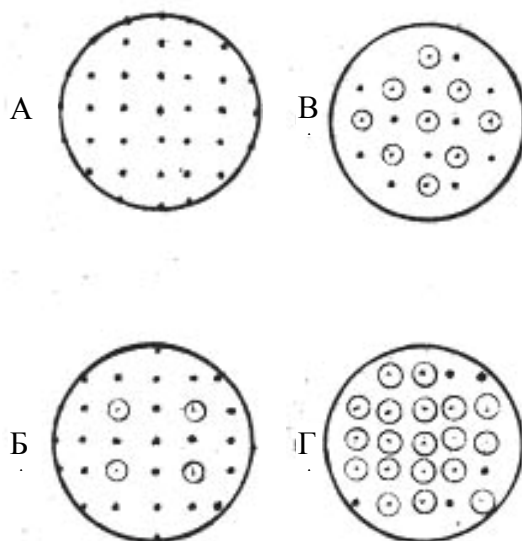


Рис. 2. Схема распределения неассоциированных молекул (черные точки) и кластеров (светлые кружки) [7] в характерных точках зависимости $\rho_{\text{ж}} = f(T)$: А – при критической температуре, $T = 647.31$; Б – при температуре кипения воды, $T = 373.16$; В – при максимальной плотности жидкости, $T = 277.14$; Г – при температуре замерзания свободной воды, $T = 273.16 \text{ K}$.

лении кристалла льда разрушается около 15 % всех водородных связей в талой воде, которые относятся к основной структурной единице жидкости. Значит можно предположить, что в точке Г (рис. 1, график 2) остается $C_2 = 85\%$ кластеров. Тогда при максимальной плотности воды их должно быть около 70 %. Следовательно, как отмечалось выше, с увеличением размеров элементов структуры при понижении температуры, плотность системы падает, что и соответствует технологической модели. Надо полагать такое проявление структуры воды особенно около температуры замерзания (плавления) приводит к ее структурированию под действием активации твердой фазой тающего льда,

в которой сохраняется ближний порядок — связь молекулы воды с четырьмя соседними, присущий структуре льда [16, 17]. Это обстоятельство отличает талую воду от обычной наличием огромного количества многополярных кластеров [13], обеспечивающих понижение плотности из-за роста элементов структуры, что также подтверждает нашу модель (рис. 2).

Если значение плотности

$$\rho_{ж} = 0.917 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (T = 273.16\text{К})$$

проэкстраполировать на график 2 (рис. 1), а затем на график 1, то соответственно можно получить значение $T = 411.16\text{ К}$ при концентрации кластеров $C_2 = 25\%$, значительно меньшем, чем при T замерзания воды. Это обстоятельство и принято называть в научной литературе, как жидкость с элементами льдоподобной структуры [13—15].

В этой связи плотность жидкости больше носит технологический характер, чем физико-химический, так как получаем одинаковую величину $\rho_{ж}$ при разной ее структуре.

Последний участок ВГ графика 2 (рис. 1) определяет как бы подготовку кластерной структуры воды к образованию, из-за различной теплоемкости кластеров и неассоциированных молекул, неоднородной структуры льда (лед, термоохлажденная вода) на начальном этапе замораживания. Наибольшее переохлаждение $T = 195.16\text{ К}$ влаги можно получить в тонкопористых материалах [14, 16].

В случае быстрого замораживания, например, неассоциированных молекул (однородной структуры, точка А. (рис. 1, рис. 2), то по-видимому, можно создать и однородную, высокопрочную, бездефектную нанострук-

туру пленок льда с повышенной плотностью.

2. Связанная вода, в отличие от свободной, находится во взаимодействии с твердой фазой, структурирующей прилегающие слои жидкости [16, 17] и участвующей в процессах тепло-массопереноса по гетеропористой структуре, подверженной усадке, под действием капиллярно-осмотических сил при высушивании торфа [9, 19].

Таким образом, к двум факторам структуры свободной воды (размеры молекул d_1 , кластеров d_2 , их концентрации C_1, C_2) добавляется третий влияние активации твердой фазы на воду, находящуюся в связанном состоянии, обеспечивающем появление максимума плотности $\rho_{ж} = f(T)$, смещенного по температуре до $T_m = (308—313)\text{ К}$ и по величине —

$$\text{до значений } \rho_{ж} = 1.16 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (i = 1)$$

$$\text{и } \rho_{ж} = 1.32 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (i = 2) \quad (\text{рис. 1}$$

графики 4, 5). При этом если в первом периоде преобладают связи Вандер-Ваальса ($i = 1$), то во втором ($i = 2$) — водородные связи при переходе от большего влагосодержания W , к меньшему ($T_i = \text{const}$). Экстраполяция зависимостей $\rho_{ж} = f(T)$ в область низких температур дает значение плотности

$$\rho_{ж} = 0.917 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (\text{рис. 1,}$$

графики 4, 5 сливаются в один). Надо полагать, т.к. второй период структурообразования ($i = 2$) связан с удалением высокопрочной, в энергетическом плане, влаги, то температура замерзания будет ниже, чем у свободной жидкости и может достигать, как упоминалось выше, значительной

величины. При это меняется и плотность замерзшей связанной влаги.

При повышении температуры ($T_i > T_m$) число H -связей, взаимодействующих с центрами сорбции, уменьшается и при $T_n = 343$ К водородные связи пропадают [18, 19, 24] (исчезает второй период структурообразования). После чего графики сливаются в один (график 4').

Дальнейшее повышение T_i определяет удаление жидкости при сушке с пониженной, по сравнению с H -связями, энергией (связи Ван-дер-Ваальса).

Следовательно, при $T = (273-343)$ К преобладает оба вида связей, проявляющиеся неодинаково в обоих периодах структурообразования из-за изменения подвижности структуры материала и числа водородных связей. Надо полагать, что переход зависимости $\rho_{ж} = f(T)$, через ρ_0 (график 3) будет обусловлен соотношением числа и энергией молекулярных связей с твердой фазой и подвижностью молекул воды, т.е. при $T_i > 383$ К (график 4'). После чего $\rho_{ж}$ в пористых материалах будет стремиться к плотности свободной воды при разных T_i . Причем подвижность μ [22] определяется отношением средней направленной скорости U ионов, движущихся в электрическом поле, к его напряженности E ,

$$\mu = \frac{U}{E}. \quad (2)$$

Последняя связана с коэффициентом диффузии D и величиной заряда e электрона [5]

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e}, \quad (3)$$

где k -const Больцмана. При этом μ падает с ростом массы M_i элементов

структуры и их статистической плотности распределения в заданном объеме.

В таком случае если в свободной воде при $T = 373$ К остается 30 % кластеров, а полностью они исчезают при $T = 647.31$ К [7], то в связанной воде (по наличию межмолекулярных водородных связей) они исчезают уже при $T = 343$ К, что подтверждается исключением из процесса структурообразования второго периода ($i = 2$) (рис. 1, график 5). Это обстоятельство снижает массу ассоциата до молекулярных размеров и повышает их подвижность и проникновение в пористую структуру твердой фазы, т.е. резко изменяет характеристики тепломассопереноса в пористых телах. Изменение положения максимума $\rho_{ж} = f(T)$ в связанной воде по сравнению со свободной, выраженное в единицах удельной энергии

$$\Delta Q_i = R^* \Delta T_i,$$

в нашем случае, составляет $\Delta Q_1 = 282.7$, а по разрушению кластерной структуры, $\Delta Q_2 = 2528.8 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$, где R^* — универсальная газовая постоянная, ΔT_i — соответствующая разность температур ($i = 1, 2$ — рассматриваемые случаи).

В этой связи для рассмотренных условий структурообразования, интервал изменения плотности жидкости находится в соответствии с данными и для прочно-связанной воды глин [7], что соответствует нашим данным для второго периода структурообразования торфяных систем с физико-химической формой связи влаги [18—20].

Рассмотренные особенности поведения связанной воды обусловлены

структурой, определяющей плотность воды под воздействием различных структурирующих факторов, изменяющих ее физико-химические отличия от других жидкостей. Например, при замораживании (оттаивании), что имеет место для почв торфяных залежей и других природных влажных материалов; при различных способах поляризации, например, при сорбции молекул на твердую поверхность; при воздействии излучений: электрических, магнитных, гравитационных, биоэлектрических (излучение от клеток растений торфообразователей в воде); механических воздействиях (переработка торфа, его перемешивание, формование, сушка) и других способах активации, определяющих аномальные свойства воды. Как и для свободной воды одинаковое значение плотности жидкости можно получить при разных значениях T , т.е. различной структуре пористого тела (в обоих периодах структурообразования) для любых экстремальных зависимостей. Эта особенность поведения связанной жидкости определяется различной степенью активации ассоциированных (кластеров) и неассоцииро-

ванных (молекул) различной концентрации элементов структуры при разных T_i . Следовательно, с позиции технологической модели выполняются схемы Б, В, Г при $T < 343.16$ К. При больших T — схемы Б, А (рис. 2).

Заключение

Показано обобщение свойств свободной и связанной воды с позиции качественной технологической модели с учетом анализа изменения обобщенного параметра их структуры — плотности жидкости. Полученные значения $\rho_{ж} = f(T_i)$ ($i = 1, 2$ — периоды структурообразования) резко отличаются между собой для свободной и связанной воды как по положению максимумов $\rho_{ж} = f(T_i)$, так и по их величине из-за отличия в концентрации кластеров и неассоциированных молекул, а также вследствие активации связанной воды твердой фазой гетеропористого торфа при положительных температурах. Отмечается, что глубокое переохлаждение если и возможно, то преимущественно для связанной воды ($T = 195.16$ К) вследствие особенностей ее активирования твердой фазой торфа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев А.Е. Влияние структурообразования на плотность жидкости коллоидных капиллярно-пористых тел. / А.Е. Афанасьев, А.С. Ефремов // ТОХТ. 2011. Т. 45. № 1. С. 119—125.
2. Афанасьев А.Е., Ефремов А.С. Патент RU 2380683 С. 1. Б.И., 2010. № 3. Способ определения средней плотности связанной жидкости коллоидных и капиллярно-пористых тел.
3. Ефремов А.С. Оценка плотности связанной жидкости коллоидных капиллярно-пористых тел при сушке / А.С. Ефремов // Вестник ТГТУ: научный журнал. Тверь: ТГТУ. 2010. Вып. 16. С. 10—16.
4. Афанасьев А.Е. Взаимосвязь структурообразования с плотностью жидкости коллоидных капиллярно-пористых тел при сушке / А.Е. Афанасьев, А.С. Ефремов // ГИАБ. М.: МГТУ. 2010. С. 307—314.
5. Лиштван И.И. Физика и химия торфа / И.И. Лиштван, Е.Т. Базин, Н.И. Гамаюнов, А.А. Терентьев. М.: Недра, 1989.
6. Ревезенский В.М. К вопросу об определении прочности одиночных контактов при сдвиговом разрушении дисперсных систем В.М. Ревезенский // Коллоид. журн. 1984. Т. 46. № 5. С. 941.
7. Российская угольная энциклопедия. В 3 т. Т. 1 (А — И). М. — СПб.: Изд-во

- СПб. картографической фабрики ВСЕГЕИ, 2004.
8. Горная энциклопедия / Гл. ред. Е.А. Козловский Т. 1. М.: Сов. Энциклопедия, 1984.
9. Афанасьев А.Е. Физико-технологическое обоснование тепловых свойств торфа / А.Е. Афанасьев, Ю.Л. Ковальчук. 1-е изд. Тверь: ТГТУ, 2009.
10. Смирнов В.И. Практическое руководство по организации добычи фрезерного торфа: учебное пособие / В.И. Смирнов, А.Н. Васильев, А.Е. Афанасьев, А.Н. Болтушкин: под ред. В.И. Смирнова. 1-е изд. Тверь: ТГТУ, 2007.
11. Гамаюнов Н.И. Сорбция в гидрофильных материалах / Н.И. Гамаюнов, С.Н. Гамаюнов. Тверь: ТГТУ, 1997.
12. Афанасьев А.Е. Моделирование пропитки коллоидных капиллярно-пористых тел различной кислотности дисперсной среды / А.Е. Афанасьев, О.В. Пухова, А.В. Волков // ГИАБ. М.: МГУ. 2004. № 2. С. 154—157.
13. Мосин О.В. Структурированная вода и способы ее получения [Электронный ресурс] // Все о воде: [сайт] / О.В. Мосин, 2009. Режим доступа: http://www.o8ode.ru/article/water/ctruktura_i_fizi4eckie_cvoictva_vody.htm
14. Химический энциклопедический словарь / гл. ред. И.П. Кнунянц /. М.: Сов. Энциклоп., 1983. С. 57.
15. Свойства воды [электронный ресурс] // Chemworld.narod.ru, 2010. Режим доступа: <http://chemworld.narod.ru/public/water.html>
16. Зенин С.В. Природа гидрофобного взаимодействия. Возникновение ориентационных полей в водных растворах / С.В. Зенин, Б.В. Тяглов. // Физ. химия. 1994. Т. 68. № 3. С.500—503.
17. Зенин С.В. Экспериментальное доказательство наличия фракций воды / С.В. Зенин, Б.М. Поланцев, Б.В. Тяглов. // Гомеопатическая медицина и акупунктура. 1997. № 2. С. 42—46.
18. Афанасьев А.Е. Структурообразование коллоидных и капиллярно-пористых тел при сушке: МОНОГРАФИЯ / А.Е. Афанасьев. Тверь: ТГТУ, 2003.
19. Афанасьев А.Е. Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства / А.Е. Афанасьев, Н.В. Чураев. М.: Недра, 1992.
20. Афанасьев А.Е. Контактные взаимодействия между частицами при обезвоживании коллоидных капиллярно-пористых торфяных тел / А.Е. Афанасьев // Коллоид. журн. 1991. Т. 53. № 3. С. 425.
21. Яминский В.В. Коагуляционные кониакты в дисперсных системах / В.В. Яминский, В.А. Пчелин, Е.А. Амелина, Е.Д. Шуклин. М.: МГУ, 1985.
22. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия. 1984.
23. Шавлов А.В. Лед при структурных превращениях / А.В. Шавлов. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996. 188 с.
24. Дерягин Б.В. Поверхностные силы / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, В.М. Муллер. М.: Наука, 1985.
25. Наумович В.М. Искусственная сушка торфа / В.М. Наумович. М.: Недра, 1984.
26. Телеснин Р.В. Молекулярная физика / Р.В.Телеснин. М.: Высшая школа. 1973. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Афанасьев Алексей Егорович – профессор, доктор технических наук,
Ефремов Алексей Сергеевич –
Тверской государственный технический университет, info@tstu.tver.ru

