УДК 628.16; 546.21: 628.19.

СТРУКТУРЫ ВОДЫ В МЕХАНИЧЕСКИХ ПОЛЯХ
WATER STRUCTURES IN MECHANICAL FIELDS

В. Д. Шантарин, М. Ю. Земенкова

V. D. Shantarin, M. Yu. Zemenkova

Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень

*Ключевые слова: экология; окружающая среда; свойства воды; структура воды;
кластеро-фрактальная модель; электропроводимость*

*Key words: ecology; environment; properties of water; structure of water; cluster-fractal model;
electric conductivity*

% 3, 2015

Нефть и газ

123

Для разработки теоретических основ поведения жидкого минерала – воды, описания процесса кластерообразования, получения термодинамических и кинетических характеристик и утверждения гипотезы о формировании ее структуры недостаточно наших знаний. Поэтому любые экспериментальные данные, проливающие свет на изменение характеристик воды, оправданы и своевременны.

Интерес к этому обусловлен тем, что природные фазовые переходы (замерзание и образование льда, испарение) представляют естественные механизмы непрерывной очистки и регенерации воды.

Любое приложенное поле к дисперсиям влияет на макроскопическую реологию, как результат разрушения и последующего структурирования (ориентации) ассоциатов в полях, во взаимодействии их в дисперсионной среде.

В Водном кодексе РФ отмечается: «Воды являются важнейшим компонентом окружающей среды, возобновляемым, ограниченным и уязвимым природным ресурсом, используются и охраняются в Российской Федерации как основа жизни и деятельности народов, проживающих на ее территории».

Поэтому не случайно, что в последнее время произошел резкий скачок исследований, посвященных физике воды и проблемам ее очистки. Проводятся исследования не только питьевой, но и исследования по мониторингу поверхностных и подземных вод, так как самоочищение водоемов — это фикция. И пьем мы теперь коктейль, приготовленный собственными руками за годы нашей всепобеждающей борьбы с природой. Появилось даже крылатое выражение: «Или человек уменьшит количество загрязнений, или загрязнения уменьшат количество людей».

Пренебрежение законами экологии может дорого обойтись человечеству.

Первое объяснение необычных свойств воды встречаем у Дж. Бернала и Р. Фаулера, предположивших, что атомы водорода примыкают к кислороду с одной и той же стороны, что вызывает возникновение электрического момента.

Для объяснения свойств воды выдвинуты структурные модели, среди которых наиболее распространены: кластерная, предложенная Ж. Немети и Н. Шерага и дополненная Н. Франком и У. Веном моделью «мерцающих кластеров», время распада которых сопоставимо со временем диэлектрической релаксации; клатратная модель воды по О. Я. Самойлову и континуальная (непрерывная) модель строения воды, впервые предложенная М. Поплом, предусматривают отсутствие молекул воды с разорванными водородными связями, образующими кольцевые ассоциаты.

В более поздних работах О. А. Пономаревым и Е. Е. Фесенко предложена континуальная солитонная модель жидкой воды, жидкокристаллическая фаза которой состоит из линейно-упорядоченных цепочек и кластеров, чувствительных к воздействию низкочастотных электромагнитных излучений, подтверждающихся оценками величин диэлектрической проницаемости и конфигурационных вкладов для свободной энергии, энтропии и удельной теплоемкости. Эффект памяти в таких системах определяется изменением концентрации солитонов в связанной структуре, какой является жидкая вода. Отмечается, что нельзя рассматривать жидкую воду как совершенно однородный продукт, не содержащий заряженных частиц, метастабильных соединений и водородных связей. Колебательный характер процессов, протекающих в водных системах, имеет определяющее значение.

Выяснению вопросов, связанных с соответствием представляемых моделей экспериментальным данным свойств воды, посвящено много работ. К сожалению, ни одна из моделей не в состоянии объяснить всю совокупность свойств воды.

Достаточно подробный анализ таких работ проведен в 80-е годы одним из авторов данной работы [1].

В последние годы появилась серия работ, посвященных физике воды [2, 3], где неоднократно отмечалась ячеистая структура водной среды и наличие фазовых переходов 2-го рода, приводящих к приобретению биологической активности воды даже после механических воздействий. Это дало возможность впервые высказать предположение, что водная среда при некоторых факторах воздействия находится в определенном информационно-фазовом состоянии [2, 3].

Если говорить об этом явлении, то, безусловно, необходимо возвратиться к истокам атомной структуры воды, ее особым свойствам, которые странным образом характеризуют сочетание и переход ее микроскопических свойств, описываемых квантовым механизмом взаимодействия, в макроскопический мир, описываемый ньютоновской физикой.

Этот переход до сих пор не нашел достаточно подробного объяснения и возможности предсказания дальнейшего поведения такой системы.

Для изучения этого явления и возможности использования его для оптимизации условий и параметров электрических полей для очистки и подготовки питьевых вод в работе измерялось время релаксации (τ_r) измерением изменений физико-химических характеристик: pH, потенциала водородного электрода (ϕ) и окислительно-восстановительного ($\Delta\phi$) потенциала, электропроводности (χ) до и после процессов механического перемешивания свежеперегретого бидистиллята, и определялось время восстановления разрушенной кластерной структуры воды [4].

Общим методом таких исследований являются прикладывание напряжений к воде и измерение времени, необходимого для того, чтобы жидкость пришла в равновесное состояние в присутствии напряжения, или, наоборот, снятие напряжения и регистрация времени возвращения в исходное состояние (время релаксации).

Перемешивание осуществлялось стандартной стеклянной мешалкой DIOPTRA n.p. TURNOV (зав. № 5942) (90 об/мин, 220 В, 50 Гц, W = 55 Вт).

Время релаксации (τ_r) фиксировалось по изменению значений водородного показателя (pH), потенциала водородного электрода (ϕ) и электропроводности (χ) воды. Показано, что температурная зависимость имеет характер неравномерного изменения этих показателей в разных температурных диапазонах. Наблюдалось резкое уменьшение τ_r от 0 до 13,7 °C и рост при последующем возрастании температуры от 13,7 до 25,7 °C, что интерпретировалось как фазовый переход 2-го рода (переход гексагональной структуры воды в кубическую), то есть характер восстановления льдоподобной структуры резко менялся, характеризуя скорость такого процесса, как изменение среднего количества Н-связей, существующих в ней при данной температуре (рис. 1–3). Расчет показывает, что эта зависимость может быть описана линейно в виде $\tau/\tau_0 = 3,8 - 0,24 t$ (°C) в температурных диапазонах (0,4 – 11,6) °C и $\tau/\tau_0 = -4,0 + 0,42 t$ (°C); (13,5 – 25,7) °C.

Показано, что время релаксации при разных методах воздействия может составлять несколько минут, то есть развивающиеся фазовые переходы 2-го рода являются достаточно медленным процессом и решающим в их образовании определяется конфигурацией водных молекул.

Рис. 1. Температурная зависимость приведенного времени релаксации (τ/τ_0) исходных значений pH, ϕ и χ для бидистиллята после его механического перемешивания ($\tau_0 = 2$ мин. — минимальное время релаксации при 13,7 °C)

Процесс сопровождается увеличением удельной электропроводности χ , то есть происходит разрушение кластерной структуры воды предположительно по схеме:

$(\text{H}_2\text{O})_{6n} \rightarrow n(\text{H}_2\text{O})_6$, где n , по данным разных авторов, может принимать значения от 5 до 65. Скорость разрушения кластерной структуры бидистиллята в первые 7 с принимает следующие значения: 0 °C – 1, 4 °C – 0,4; 9 °C – 0,4 и 15 °C – 0,85 мВ/с. При последующем перемешивании эти скорости уменьшаются до следующих значений: 0,0230; 0,086; 0,17 и 0,03 в том же температурном диапазоне. Затем следует медленное изменение потенциала водородного электрода до максимального значения (см. рис. 2)

и в последующем изменения физико-химических параметров бидистиллята не происходит в течение всего времени разрушения (свыше 1 ч).

Рис. 2. Кинетика изменения потенциала водородного электрода (ϕ) от времени разрушения (τ_p) кластерной структуры бидистиллята при его механическом перемешивании при температурах: 1–4 соответственно при 0, 4, 9 и 15 °C

Экспериментальные данные (см. рис. 3), характеризующие температурную зависимость времени разрушения (τ_p) и восстановления (τ_b), в работе объяснены изменением кластерной структуры воды.

Рис. 3. Кинетические характеристики времени разрушения (τ_p) и восстановления (τ_b) исходных значений ϕ и χ бидистиллята при температурах: 0, 4, 9 и 15 °C (механическое перемешивание)

Следует отметить различный характер этих зависимостей в разных температурных диапазонах, которые описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} T = 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \tau_b(\tau_p) &= 5,44 \tau_p^{0,64}; \\ T = 4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \tau_b(\tau_p) &= 0,125 \tau_p^{1,6}; \\ T = 9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \tau_b(\tau_p) &= -3,85 \ln(\tau_p) + 7,50 \sqrt{\tau_p} + 24,0; \\ T = 15 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \tau_b(\tau_p) &= 73,9 \ln(\tau_p) - 13,8 \sqrt{\tau_p} - 31,8. \end{aligned}$$

Кластерная модель строения воды предусматривала возможность создания таких долгоживущих структур, возникающих и исчезающих через определенные промежутки времени, так называемых мерцающих кластеров.

Результаты исследований можно объяснить, исходя из кластеро-фрактальной модели, которая рассматривает воду, как смесь свободных молекул и фрагментов с упорядоченной гексагональной структурой, в вершинах шестиугольников которой находятся радикалы $\text{OH}^\cdot$.

Основная структурная ячейка воды как окончательное по механизму построения стабильное структурное образование, проявляя себя в виде супермолекулы, обладает свойством лабильной слабоэнергетической кулоновской связи по граням в соответствии с распределением зарядов по 24-м центрам, то есть своего рода зарядовая комплементарность. Одним из факторов, подтверждающих предлагаемую стабильную структуру ассоциата, является интерпретация наблюдаемых изменений pH, ϕ и γ , показывающих последовательность распада структурного элемента воды под действием механического поля.

Изменение pH с течением времени можно объяснить двояким образом. С одной стороны, это может происходить в связи с тем, что высвободившиеся в результате диссоциации ионы водорода в воде, сильно взаимодействуя с нейтральными молекулами

жидкости, образуют ионы оксония H_3O^+ , что связано с энергией связи различных нейтральных частиц молекул и радикалов — с протоном, то есть так называемым сродством к протону. С другой стороны, уменьшение рН, возможно, связано с насыщением воды кислородом воздуха. Кислород растворяется в воде, для компенсации образующегося заряда вокруг O_2 собираются ионы H^+ , при этом образуется OH^- .

Скорость восстановления равновесного состояния системы отражается временами релаксации. Они различны в зависимости от того, чем определяется восстановление равновесия: рекомбинацией частиц или их перемещением (в последнем случае они связаны с подвижностью).

Определение подвижности ионов H^+ и OH^- показало, что она значительно больше подвижностей других одновалентных ионов в воде. Подвижность иона H^+ в воде ($3,62 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) меньше, чем во льду ($8 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$), из-за того, что система водородных связей в жидкой фазе не совершенна. Быстрый перенос протонов имеет место только внутри сильно гидратированных комплексов, подобных H_3O_4^+ . Дальнейшая трансляция протона требует образования сильной водородной связи на периферии комплекса. По этой причине скорость переноса протона в воде ограничивается скоростью, с которой молекула в окрестности гидратированного комплекса принимает ориентации, допускающие быстрый перенос протона и тем самым диффузию комплекса (Эйзенберг Д., Кауцман В.).

Согласно М. Эйгену и Л. Мауеру ион H_3O^+ более гидрофобен, чем молекула воды, поэтому располагается, как правило, в полостях каркаса. Связи иона H_3O^+ с молекулами обрамления таковы, что последние частично поляризуются, создавая на поверхности полости избыточный отрицательный заряд. По О. Я. Самойлову имеет место принцип наименьшего искажения структуры воды, поэтому естественно предположить, что в воде связи полостных молекул с молекулами каркаса такие же, как и в случае H_3O^+ . Молекулы воды, взаимодействуя со скоплениями вытесненных полостных молекул, ориентируются так, что их дипольные моменты направляются в сторону твердой фазы, и во льду возникает положительный, а в воде отрицательный потенциалы.

Анализ полученных зависимостей возможен с использованием теории переходного состояния (А. И. Френкель).

Рассмотрим характерные времена процессов. Обозначим время установления равновесия в однородной системе при изменении внешних условий через τ . Оно характеризуется самым медленным из релаксационных процессов: теплопередачей, перестройкой структуры и т. п., то есть время роста льдоподобной поверхности раздела определяется не только и не столько теплофизическими свойствами воды, но и рядом других физических процессов, протекающих вблизи границы фазового перехода. Можно представить, в первом приближении, время релаксации, то есть время восстановления исходных параметров воды, которые были вызваны механическим разрушением кластерной структуры воды, в виде:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_1}{RT}\right) \exp\left(\frac{E_2}{KT}\right) \exp\left(\frac{E_H}{T}\right) \exp\left(\frac{E_0}{K}\right) \quad (1)$$

где E_1 , E_2 , E_H и E_0 — соответственно энергии активации или энтальпии разрыва одной, двух и неразорванных водородных связей и молекул без связей, (в этом случае подразумеваются лишь связи протонов данной молекулы с соседними молекулами (А. И. Френкель). Воспользовавшись данными П. Л. Привалова [5], где приведены относительные концентрации (C) молекул воды с различным количеством Н-связей в температурном диапазоне от 0 до 72 °С, рассматривая разрывы связей как химические реакции, нами построены зависимости в полулогарифмических координатах $\ln C - 1/T$ и рассчитаны значения энергии активации этих процессов: $E_1 = 0,76$; $E_2 = 9,76$; $E_H = 3,46$ и $E_0 = 3,50$ кДж/кмоль.

Воспользовавшись теорией переходного состояния и гидрофобной моделью структуры ассоциатов воды, в работе проведен расчет скорости роста и разрушения кластерной структуры ($1/\tau$) по уравнению

$$1/\tau = N_1 \exp\left(-\frac{E_D}{kT}\right) \exp\left(-\frac{W_3}{kT}\right), \quad (2)$$

где N_1 — число молекул в единице объема жидкой фазы, $E_D = 18$ кДж/моль (энергия активации самодиффузии молекул воды), $i q \sim 1$ (q — доля нескомпенсированных переходов, а i — число молекул на поверхности критического зародыша), W_3 — работа образования критического зародыша из n молекул в воде.

Для расчета значений W_3 воспользовались данными В. П. Скрипова, Д. А. Фридрихсберга и Ю. В. Пахарукова. Расчеты возможной массы и размеров кластеров осуществлены в предположении их шарообразной формы. Сопоставление экспериментальных и теоретически рассчитанных скоростей кластерообразования ($1/\tau$) приведено в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные значения скорости разрушения ($1/\tau P, c^{-1}$) и восстановления ($1/\tau B, c^{-1}$) кластерной структуры бидистиллята при механическом перемешивании и теоретически рассчитанная скорость ($1/\tau B^{теор}, c^{-1}$)

$T, ^\circ C$	τ_P, c	$1/\tau_P, c^{-1}$	τ_B, c	$1/\tau_B, c^{-1}$	$1/\tau_B^{теор}, c^{-1}$
0	180	$5,66 \cdot 10^{-3}$	170	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$
4	70	$1,43 \cdot 10^{-2}$	120	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
9	60	$1,7 \cdot 10^{-2}$	70	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$
15	120	$8,3 \cdot 10^{-3}$	180	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$

Экспериментальные данные по порядку величины совпадают с теоретически рассчитанными. Вполне очевидно, что с ростом температуры относительное число неразрывных связей уменьшается, и возрастает количество молекул воды без связей, что отражается почти одинаковыми значениями энергии активации этих процессов: $E_H = 3,46$ и $E_0 = 3,50$ кДж/кмоль. Значения энергии активации для процесса разрыва одинарных связей свидетельствуют о постоянстве их в данном температурном диапазоне, а вот значения энергии активации процесса разрыва двойных связей резко увеличиваются до величины $E_2 = 9,76$ кДж/кмоль.

Если предположить, что при механическом перемешивании происходит разрыв значительного количества водородных связей, а изменение их по температуре не одинаковое, то восстановление кластерной структуры воды при разных значениях температуры будет происходить, очевидно, с разной скоростью, что подтверждается экспериментальными данными.

Что касается точки перегиба (см. рис. 1), то она характеризуется перестройкой гексагональной структуры воды в кубическую. Размытость данных в температурном интервале от 12 до 16 $^\circ C$ объяснима степенью чистоты получаемого бидистиллята и наличием в нем некоторого количества веществ. Однако такие исследования изменения поведения воды при содержании в ней микроколичеств веществ все равно представляют теоретический и практический интерес для понимания строения воды, так как в этом случае структура не нарушена из-за эффекта избытка вещества, и ее изменение проявляется в чистом виде.

Замедление степени восстановления кластерной структуры обусловлено, с одной стороны, работой сил межмолекулярного взаимодействия, а с другой — тепловым движением, которое способствует разрушению этих связей.

Когда частицы подходят друг к другу при взаимном соответствии, обеспечивающим связь дополняющих друг друга структур (молекул воды) и определяемом их химическими свойствами, то происходит присоединение молекул воды к поверхности уже образовавшегося кластера. Таким образом, если поверхности молекул имеют комплементарные структуры, а это присуще воде ввиду ее дипольного строения, так что выступающая группа (или положительный заряд) на одной поверхности соответствует полости (или отрицательному заряду) на другой. Иными словами, взаимодействующие молекулы должны подходить друг к другу, как ключ к замку.

В этих цепях возникают водородные связи. В БЭС [6] отмечается: «Комплементарность, по-видимому, единственный и универсальный химический механизм матричного хранения и передачи генетической информации».

Очевидно, что объяснение изменения pH бидистиллята возможно не только с точки зрения разрушения кластерной структуры воды, но изменением концентрации ионов H^+ и OH^- в процессе такого перемешивания. Можно предположить, что воздействие

механического поля приводит не только к разрыву связи Н-ОН с образованием ионов Н⁺ и ОН⁻, но и их радикалов Н[•], ОН[•]; компонентов Н₂О[•], Н₂О₂[•] и продуктов их взаимодействия. Для этого проведены исследования по определению радикалов ОН[•]. Известно, что щавелевая кислота окисляется только радикалами ОН[•], следовательно, количество расходуемых ионов СОО⁻ при концентрации щавелевой кислоты не менее 0,05 моль/дм³ эквивалента можно принять за выход радикалов. Экспериментальные данные приведены в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 2

Значения экспериментальных данных по концентрации радикалов С_{ОН}.

t, °C	τ _p , с	Анализатор жидкости АНИОН -7050 в комплекте с платиновым электродом и электродом сравнения ЭСр-10101			K _{KMnO₄}	Средний объем 3-х параллельных определений		С _{ОН} , ммоль/дм ³
		t, °C	pH	φ, мВ		X _{ход} , см ³	X _{проб} , см ³	
0	0 180	0,0 0,1	6,44 5,74	+50 +75	1,0010	9,98	9,80	0,03938
4	0 70	4,0 4,0	6,61 5,69	+42 +89	1,0010	9,98	9,78	0,05111
4	0 70	4,3 4,1	6,38 5,93	+53 +72	1,0309	9,70	9,53	0,04620
								0,04866
9	0 60	10,5 9,3	6,58 6,14	+44 +48	1,0121	9,88	9,73	0,04110
		9,3 9,2	6,27 5,97	+59 +89				0,05266 0,04688
15	0 120	15,3 15,3	6,20 5,47	+64 +105	1,0070	9,93	9,77	0,03817
15	0 120	14,9 14,7	6,12 5,18	+68 +119	1,0070	9,93	9,85	0,02036
		15,0 14,8	6,19 5,18	+64 +118				0,02714 0,02856

Рис. 4. Температурная зависимость изменения концентрации радикалов ОН[•].

Концентрация щавелевой кислоты определяется титрованием [7, 8] раствором КМnО₄ с концентрацией 0,05 моль/дм³ эквивалента в кислой среде при 80 °С.

Результаты наших исследований подтверждают кластеро-фрактальную модель, которая рассматривает воду как смесь свободных молекул и фрагментов с упорядоченной гексагональной структурой, в вершинах шестиугольников которой находятся радикалы ОН[•].

Предположения ряда авторов о разрушении кластерной структуры воды и увеличении степени диссоциации подтверждаются и нашими данными по увеличению ее электропроводимости, что свидетельствует об увеличении степени диссоциации воды и возникновении ионов Н⁺ и ОН⁻, то есть электропроводимость чистой воды, в основном, зависит от концентрации ионов Н⁺ и ОН⁻ в ней и от способности воды к эстафетному способу передачи этих ионов. Последняя способность воды, естественно, зависит от ее структурно-информационного состояния.

Выяснению вопросов, связанных с соответствием представляемых моделей экспериментальным данным свойств воды, посвящено значительное количество работ. К сожалению, ни одна из моделей, рассматривающих воду как неравновесную систему, не в состоянии объяснить всю совокупность свойств воды, обладающую свойствами самоорганизации и чувствительную к слабым полевым воздействиям, приложенным длительное время.

Мы не в состоянии постигнуть нелинейность и непредсказуемость поведения воды, пока не уясним связи между атомами в молекуле воды, что описано в литературе, а вот о межмолекулярном взаимодействии в плане описания его с квантово-механических позиций и соединения с макроскопическим уровнем поведения материи, на наш взгляд, недостаточно данных.

Список литературы

1. Шантарин В. Д., Войтенко В. С. Физико-химия дисперсных систем. – М.: Недра, 1990. – 315 с.
2. Зенин С. В. Структурное состояние воды как основа управления поведением и безопасностью живых систем: дис. на соискание учёной степени докт. биол. наук. – М., 1999. – 207 с.
3. Зенин С. В. Анализ воды как пятого состояния вещества. Шестой Международный конгресс «Вода: экология и технология» ЭкваТэк-2004. – М., 1–4 июня 2004 г. – Ч. 11. – С. 973.
4. Аширбакиева Г. С., Шантарин В. Д. Исследование кинетических особенностей кластерообразования в биодистилляте воды. Материалы 13-ой Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-13-2007)» 1–3 октября 2007. – Кемерово: ТомГУ. – С. 44-46.
5. Привалов П. Л. Вода и ее роль в биологических системах // Биофизика. – 1968. – Т. 13. – Вып. 1. – С. 163-177.
6. БСЭ. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия». – Третье издание. – 1973. – Т. 12. – С. 591.
7. Домрачев Г. А., Родыгин Ю. Л., Селивановский Д. А. Механохимически активированное разложение воды в жидкой фазе // ДАН. – 1993. – Т. 329. – № 2.
8. Витенько Т. Н., Гумницкий Я. М. Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду // Химия и технология воды. – 2007. – 29. – № 5. – С. 422-432.
9. Земенков Ю. Д., Курушина В. А., Вылегжанина А. О., Барменкова В. В., Хайруллина Н. Г. Современный менеджмент и инновационная научно-техническая политика: Монография / Ю. Д. Земенков, В. А. Курушина, А. О. Вылегжанина и др. - Saint-Louis, MO: Publishing House «Science and Innovation Center», 2013. – 80 с.
10. Шпилевой В. А., Курушина Е. В., Земенков Ю. Д. Управление энергоёмкостью в условиях российской экономики // Известия высших учебных заведений. Социология. Экономика. Политика. – 2012. – № 3. – С. 61-65.

Сведения об авторах

Шантарин Владислав Дмитриевич, д. т. н., профессор кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 89044922052, e-mail: shantarin33@mail.ru

Земенкова Мария Юрьевна, к. т. н., доцент кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 891919433533, e-mail: muzemenkova@mail.ru

Information about the authors

Shantarin V. D., Doctor of Engineering, professor of the chair «Transport of hydrocarbon resources», Tyumen State Oil and Gas University, phone: 89044922052, e-mail: shantarin33@mail.ru

Zemenkova M. Yu., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Transport of hydrocarbon resources», Tyumen State Oil and Gas University, phone: 891919433533, e-mail: muzemenkova@mail.ru