

## НОВЫЕ СТРУКТУРНО-АДДИТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕВОДОРОДОВ

*В.П. Железный, А.С. Маркварт  
(Одесская Государственная академия холода)*

Проблема информационного обеспечения науки и техники достоверной информацией о физико-химических свойствах углеводородов, нефтей и газовых конденсатов до сих пор остается нерешенной. Из-за широкой номенклатуры углеводородов (а также многообразия их возможных смесей) данные об их теплофизических свойствах не могут быть получены экспериментальными методами. С другой стороны, методы статистической физики и термодинамики не позволяют с необходимой точностью рассчитывать свойства многоатомных углеводородов, и тем более таких мультикомпонентных термодинамических систем, как нефть или газовый конденсат.

К настоящему времени предложено довольно много различных феноменологических методов для расчета теплофизических свойств веществ (ТСВ), например [1–2]. Однако, когда речь идет о таких сложных объектах исследования, как нефть, газовый конденсат, природный газ и продукты их переработки, выполнение расчетов в рамках известных методов превращается в достаточно сложную задачу. При этом следует учитывать, что большая часть опубликованных методик расчета ТСВ разработана для индивидуальных углеводородов или смесей определенного состава. Использование этих методов расчета применительно к мультикомпонентным смесям неопределенного состава приводит к дополнительным погрешностям, величину которых оценить проблематично. Именно по этим причинам продолжает оставаться актуальной проблема дальнейшего развития моделей для прогнозирования физико-химических свойств углеводородов, которые основаны на использовании минимального объема доступных экспериментальных данных.

При прогнозировании свойств чистых углеводородов наибольшее распространение получили модели, основанные на информации о строении химического соединения. Вместе с тем накопленный опыт применения моделей *структура – свойство* для расчета физико-химических свойств углеводородов показывает, что они имеют определенные недостатки. Некоторые авторы, например [1, 3, 4], подчерки-

вают, что макрофизические свойства ( $y$ ) и величины, характеризующие соотношения между этими свойствами ( $y'$ ), только косвенно зависят от состава и структуры молекул. Существенное влияние на свойства углеводородов оказывают такие факторы, как масса, объем, форма, поляризуемость, диэлектрическая проницаемость и дипольный момент молекулы. Поэтому  $y$  и  $y'$  не могут в полной мере подчиняться принципу аддитивности. Кроме того, физико-химические свойства одновременно зависят от двух и более перечисленных факторов, что усложняет развитие методов расчета, основанных на модели *структура – свойство*. Учитывая вышеизложенное, указанные модели обычно используются при расчете теплофизических свойств только для определенных гомологических рядов углеводородов.

Именно по этим причинам для понижения погрешности прогнозирования свойств углеводородов ряд авторов рекомендует классифицировать углеводороды в зависимости от значений критериев подобия [1–2], фактора сложности межмолекулярного взаимодействия [5] и фактора полярности Стила [1]. Выполненный анализ показывает, что повышению качества расчета свойств углеводородов способствует включение в расчетные модели *структура – свойство* различных корректирующих коэффициентов, которые учитывают изменение характера межмолекулярных взаимодействий при замене или добавлении определенных атомов в молекуле углеводородов [6].

### **Модель *SP-QSPR* для прогнозирования теплофизических свойств веществ**

Модели, основанные на структурно-аддитивном определении некоторых теплофизических свойств веществ с использованием информации о строении химического соединения, получили название *QSPR (quantitative structure-property relationship)*. В рамках указанных методов при выполнении расчетов свойств веществ широко применяются так называемые *конститутивные свойства*, или *конститутивные комплексы*, значение которых рассчитывается по правилу аддитивности долей (инкрементов) всех элементов, входящих в молекулу вещества, а также их связей.

Несмотря на простоту, методы *QSPR* хорошо зарекомендовали себя лишь в задачах прогнозирования свойств достаточно простых веществ при параметрах, близких к температуре кипения. Основной причиной, ограничивающей применение методов *QSPR*, является сложность учета таких факторов, как масса, объем, форма, поляризуемость, дипольный момент молекул и т.д. Кроме того,

отсутствуют рекомендации по выбору параметров состояния, при которых должны рассчитываться инкременты. До сих пор остаются неизученными температурные зависимости для таких конститутивных величин, как парахор, мольная рефракция, ортохор и др. Таким образом, метод прогнозирования свойств веществ с использованием моделей *QSPR* не может обеспечить необходимую точность расчета термодинамических функций таких сложных термодинамических систем, как нефть или газовый конденсат.

В настоящей статье предлагается новая методика прогнозирования свойств веществ – *SP-QSPR*, в которой принципы скейлинга (*SP*) интегрируются в структурные методы прогнозирования. Основным принципом скейлинга заключается в использовании универсальных соотношений между критическими индексами и комплексами амплитуд [6]. Как показывают проведенные исследования, применение универсальных кроссоверных функций для расчета эффективных показателей степени позволяет качественно прогнозировать теплофизические и электрофизические свойства неассоциированных жидкостей в широком диапазоне температур [7, 8].

В соответствии с изложенными в работах [7, 8] принципами расширенного скейлинга теплофизические свойства веществ на линии кипения – капиллярная постоянная  $a^2$ , разность плотностей на линии кипения и конденсации  $\Delta\rho = \rho' - \rho''$ , плотность на линии кипения  $\rho'$ , поверхностное натяжение  $\sigma$ , показатель преломления  $n$  – могут быть описаны простыми двухконстантными зависимостями вида (1)–(5). Для аппроксимации и прогнозирования давления насыщенных паров  $P_s$  рекомендуется использовать малоконстантное уравнение (6) [9].

$$a^2 = a_0 \cdot t^{n \cdot \psi(t)}; \quad (1) \quad \Delta\rho = B_0 \cdot t^{\beta \cdot f(t)}; \quad (2)$$

$$\sigma = (a_0 \cdot \rho_0 / 2) \cdot g \cdot t^{n \cdot \psi(t) + \beta \cdot f(t)} = \sigma_0 \cdot t \quad (3) \quad \ln(n) = \ln(n_c) + B_n \cdot \Omega^{\beta \cdot F(\Omega)} \quad (4)$$

$$\ln \omega' = B_1 \cdot \Omega^{\beta_1 \cdot F_1(\Omega)}; \quad (5) \quad \ln(1/\pi_s) = \alpha_R \cdot \Omega + b \cdot \Omega^c, \quad (6)$$

где  $a_0, \rho_0, \sigma_0, B_0, B_n$  – амплитуды, характеризующие индивидуальные свойства веществ;  $\alpha_R, b$  – индивидуальные коэффициенты, определяемые из опытных данных;  $c = 2,64$ ;  $\Omega = \ln(T_c / T)$  и  $t = 1 - T / T_c$  – приведенные температуры;  $n, \beta, \mu$  – критические показатели степени;  $\psi(t), f(t), F(t), F_1(\Omega)$  – универсальные кроссоверные функции,

уравнения для расчета которых представлены в работах [6–8];  $\pi_s = P_c / P_s$  – приведенное давление;  $\omega' = \rho / \rho_c$  и  $\omega'' = \rho_c / \rho''$  – приведенные плотности.

Предложенные корреляции обладают высокими экстраполяционными возможностями и позволяют описывать термодинамические функции во всем интервале температур существования жидкой фазы, включая окрестность критической точки. Причем значения коэффициентов уравнений практически не зависят от интервала параметров, в котором они выделяются из экспериментальных данных. Дополнительным преимуществом предложенных корреляций является термодинамическая согласованность критических амплитуд и критических индексов. Предлагаемая методика прогнозирования ТСВ дает возможность при наличии информации о значениях двух амплитуд определить остальные из нескольких известных универсальных соотношений [6, 10]. Предложенные в [7, 8] комплексы амплитуд могут применяться для проверки качества прогнозирования критических параметров и критериев термодинамического подобия.

Таким образом, в настоящей статье предлагается использовать принцип двухпараметрической универсальности вместе с предложенной в работах [7, 8] концепцией об универсальности кроссоверных функций для критических показателей степени.

Для уменьшения объема исходной информации при прогнозировании ТСВ и согласования принципов скейлинга с моделью *QSPR* авторы предлагают использовать новые структурно-аддитивные комплексы: изинговое значение парахора  $[P]_c$  и мольную рефракцию в критической точке  $[R]_c$

$$[P]_c = \frac{M \cdot \sigma_0^{\beta/\mu}}{\rho_0}; \quad (7) \quad [R]_c = V_c \cdot n_c^{B_c/B_n} \quad (8)$$

где  $\rho_0$ ,  $\sigma_0$ ,  $B_c$ ,  $B_n$  – амплитуды, характеризующие индивидуальные свойства веществ;  $\beta$ ,  $\mu$  – критические показатели степени;  $V_c$  – критический мольный объем;  $n_c$  – показатель преломления в критической точке.

В результате проведенного исследования впервые установлены аналитические зависимости между парахором  $[P]_c$ , ортохором (мольный объем жидкости при температуре кристаллизации)  $O_r$  [1], мольной рефракцией  $[R]_c$ , мольным объемом при нормальной температуре кипения  $V_{nb}$ , критическими амплитудами для плотности  $[V]_0 = M / \rho_0$  и

поверхностного натяжения  $\sigma_0$ , мольной рефракцией в критической точке  $[R]_c$ , критическим мольным объемом  $V_c$  (табл. 1).

Таблица 1

Соотношения между конститутивными комплексами  
и критическими параметрами углеводородов

	$O_r$	$R_c$	$[P]_c$	$V_0$	$V_c$	$V_{nb}$
$O_r$	–	$8,467 \cdot O_r$ $AAD = 3,8$	$2,467 \cdot O_r$ $AAD = 4,1$	$0,815 \cdot O_r$ $AAD = 2,4$	$3,212 \cdot O_r$ $AAD = 3,1$	$1,269 \cdot O_r$ $AAD = 6,6$
$R_c$	$0,1181 \cdot R_c$ $AAD = 3,8$	–	$0,2914 \cdot R_c$ $AAD = 1,8$	$0,09625 \cdot R_c$ $AAD = 3,0$	$0,3795 \cdot R_c$ $AAD = 1,8$	$0,1499 \cdot R_c$ $AAD = 3,3$
$[P]_c$	$0,4053 \cdot [P]_c$ $AAD = 4,2$	$3,432 \cdot [P]_c$ $AAD = 1,9$	–	$0,3304 \cdot [P]_c$ $AAD = 3,0$	$1,302 \cdot [P]_c$ $AAD = 2,4$	$0,5145 \cdot [P]_c$ $AAD = 4,2$
$V_0$	$1,227 \cdot V_0$ $AAD = 2,4$	$10,39 \cdot V_0$ $AAD = 2,9$	$3,027 \cdot V_0$ $AAD = 2,9$	–	$3,942 \cdot V_0$ $AAD = 2,1$	$1,557 \cdot V_0$ $AAD = 5,7$
$V_c$	$0,3113 \cdot V_c$ $AAD = 3,1$	$2,635 \cdot V_c$ $AAD = 1,8$	$0,768 \cdot V_c$ $AAD = 2,3$	$0,2537 \cdot V_c$ $AAD = 2,1$	–	$0,3951 \cdot V_c$ $AAD = 4,7$
$V_{nb}$	$0,788 \cdot V_{nb}$ $AAD = 6,8$	$6671 \cdot V_{nb}$ $AAD = 3,4$	$1,944 \cdot V_{nb}$ $AAD = 4,4$	$0,6423 \cdot V_{nb}$ $AAD = 5,9$	$2,531 \cdot V_{nb}$ $AAD = 4,8$	–

Примечание:  $AAD = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{calc} - X_{exp}}{X_{exp}} \right|$ .

Как отмечается в ряде работ [1, 2], мольный критический объем связан с микрообъемом молекулы и характерным параметром длины. В работе [2] автор утверждает, что критический объем определяется в первую очередь составом молекулы, а не ее структурой, причем в современных методах точность прогнозирования этого параметра является высокой. Таким образом, можно сделать вывод, что перспективы предложенной для расчета ТСВ углеводородов модели *SP-QSPR* определяются установленными корреляциями между структурно-аддитивными свойствами (комплексами) и мольным критическим объемом.

С целью повышения качества расчета ТСВ и обеспечения термодинамической согласованности конститутивных величин определены инкременты для значений парахора, ортохора, мольного критического объема, мольной рефракции в критической точке и критической амплитуды для плотности жидкой фазы. Полученные значения структурных инкрементов  $V_0$ ,  $[P]_c$ ,  $R_c$ ,  $O_r$  для алканов и их галогенопроизводных приведены в табл. 2. Относительная погрешность расчета конститутивных комплексов с использованием структурных

инкрементов не превышает соответственно:  $\delta O_r \pm 2,5 \%$ ,  $\delta R_c \pm 3,41 \%$ ,  $\delta [P]_c \pm 3,5 \%$ ,  $\delta V_0 \pm 1,9 \%$ ,  $\delta V_{nb} \pm 2,6 \%$ .

Таблица 2

Значения структурных инкрементов  $V_c$ ,  $V_{nb}$ ,  $V_0$ ,  $[P]_c$ ,  $R_c$ ,  $O_r$   
для углеводородов ( $C_nH_{2n+2}$ ) и их галогенопроизводных ( $C_nH_iCl_jF_k$ )

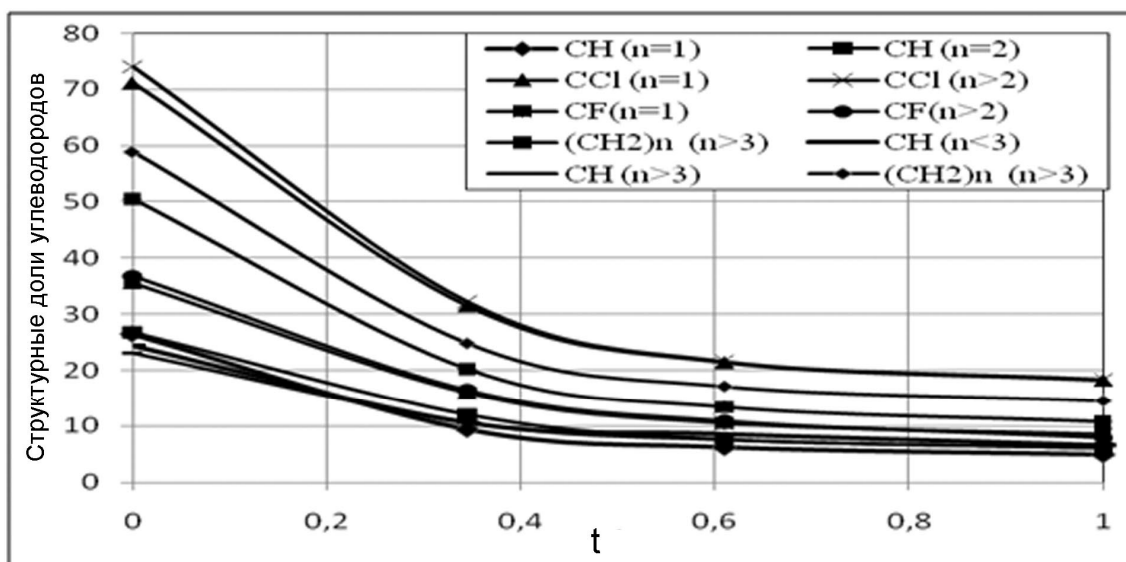
Химическая формула	Количество атомов углерода	Структурные доли	$V_0$	$[P]_c$	$R_c$	$O_r$	$V_{nb}$	$V_c$
$(C_nH_iCl_jF_k)$	1	-CH	5,9	22,3	66	6,2	7,4	26,5
		-CCl	18,2	57,3	186	22,4	26,5	71,2
		-CF	9,51	25,9	92,7	11,5	13,9	35,5
	$\geq 2$	-CH	6,13	21,4	65,6	7,7	9,05	26,7
		-CCl	18,4	55,9	190	23,4	27,2	74
		-CF	9,9	26,7	96,2	11,9	14,4	36,8
$\geq 3$	$-(CH_2)_n-$	10,8	42	125	14,4	18,2	50,5	
$(C_nH_{2n+2})$	$< 3$	-CH	6,5	19,4	63,9	8,5	9,35	24,4
	$\geq 3$	-CH	6	18	59,2	7,46	8,52	23
		$-(CH_2)_n-$	14,5	44,3	155	17,1	22,8	58,9
Погрешность		AAD, %	0,88	1,09	1,19	1,05	1,17	0,98

С учетом погрешности, использованной при расчетах исходной информации о теплофизических свойствах углеводородов, и точности значений их критических параметров это согласование следует признать вполне удовлетворительным. Выполненный анализ показывает, что значения структурных инкрементов рассматриваемого класса химических соединений зависят от температуры (рисунок). С увеличением температуры их значения увеличиваются. Следовательно, мольный объем жидкой фазы на линии кипения при различных температурах является структурно-аддитивной величиной и может рассматриваться в качестве исходной информации при прогнозировании критических параметров и различных теплофизических свойств на линии кипения.

Следует также отметить, что ортохор, мольный объем, а также изинговый парохор, мольная рефракция и критический мольный объем в пределах погрешности измерений пропорциональны друг другу (см. табл. 2).

По мнению авторов [7], этот факт указывает на определяющее влияние универсального изменения флуктуаций плотности на характер изменения различных физико-химических свойств углеводородов. Полученные уравнения, устанавливающие связь между структурно-

аддитивными комплексами и мольным критическим объемом, позволяют разрабатывать различные схемы прогнозирования критических параметров, вязкости, поверхностного натяжения, плотности и показателя преломления углеводородов.



Зависимость мольного объема алканов и их галогенопроизводных от приведенной температуры  $t = 1 - T / T_c$

### Прогнозирование псевдокритических параметров газовых конденсатов и их фракций

Информация о критических и псевдокритических параметрах веществ и растворов необходима для корректной экстраполяции термодинамических свойств объектов исследования в область высоких температур и для реализации методик прогнозирования свойств сложных термодинамических систем, которые основаны на соблюдении закона соответственных состояний. Использование критических параметров позволяет выразить соотношения между различными свойствами веществ в инвариантной форме и придать им универсальный характер. Вместе с тем вопросы прогнозирования критических параметров нефти, газового конденсата и их фракций на сегодня являются недостаточно изученными [11].

Нефть и газовый конденсат являются *сложными*, или, как предпочитают называть их некоторые авторы, *нетрадиционными* термодинамическими системами. Иначе говоря, это мультикомпонентные объекты исследования, информация о составе которых ограничена или отсутствует, а методы прямого экспериментального исследования их критических параметров не могут быть реализованы из-за термической

нестабильности некоторых компонентов. Следовательно, широко применяемые структурно-аддитивные методы расчета теплофизических свойств чистых углеводородов не могут быть использованы для прогнозирования псевдокритических параметров нефти, газового конденсата и их фракций.

Термодинамически согласованные методики расчета псевдокритических параметров углеводородов и нефтепродуктов на основе ограниченной экспериментальной информации об их свойствах в настоящее время отсутствуют. В качестве такой информации для нефти и газового конденсата обычно используют данные о структурно-групповом углеводородном составе, средней молекулярной массе, а также характеристические параметры – показатель преломления, плотность при температуре 20 °С и различные температуры кипения. Детальный анализ методов определения псевдокритических параметров нефтепродуктов приведен в монографии [11]. Он показывает, что общей чертой предложенных корреляций для расчета псевдокритических параметров является их эмпирический характер и отсутствие термодинамической согласованности с теплофизическими свойствами нефтепродуктов на линии кипения в широком интервале температур.

Чтобы исключить указанные недостатки, корреляции для расчета критических (псевдокритических) параметров веществ должны отвечать нескольким требованиям: незначительное количество параметров, имеющих определенный физический смысл; высокие экстраполяционные возможности применяемых корреляций; инвариантность значений параметров корреляций относительно диапазона параметров используемой эмпирической информации.

По мнению авторов настоящей статьи, уравнения скейлинга с универсально изменяющимися эффективными показателями степени, предложенные в работах [7, 8], отвечают указанным требованиям в полной мере.

Для определения псевдокритических параметров газовых конденсатов и их фракций в одножидкостном приближении в настоящей статье использовались малоконстантные уравнения (1)–(6) и установленные зависимости между критическими параметрами и структурно-аддитивными комплексами (см. табл. 1), которые могут быть вычислены из ограниченной экспериментальной информации, т.е. без использования процедуры суммирования структурных инкрементов. В качестве исходной информации рекомендуется использовать наиболее доступную: данные о структурно-групповом углеводородном составе,



средней молекулярной массе и характеристических параметрах. Качество прогнозирования псевдокритических параметров может быть улучшено, если информация о плотности и давлении насыщенных паров газоконденсатов ограничена узким температурным диапазоном (20–100 °С).

Для расчета псевдокритических параметров газовых конденсатов были использованы данные о характеристических параметрах и мольном объеме при температуре кипения, приведенные в монографии [10]. Наличие информации о мольном объеме газовых конденсатов при нормальной температуре кипения позволяет, используя корреляции, приведенные в табл. 1, рассчитать различные структурно-аддитивные комплексы, включая мольный критический объем. Значения псевдокритических температур газовых конденсатов были вычислены из уравнения (5) на основе информации о плотности при температуре 20 °С.

Значения псевдокритических давлений газовых конденсатов были рассчитаны при аппроксимации уравнением (6) справочных данных [11] о давлении насыщенных паров в интервале температур (20–100 °С). Полученные значения псевдокритических параметров для некоторых газовых конденсатов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения псевдокритических параметров  
некоторых газовых конденсатов

Месторождение	$\bar{T}_c$ , К	$\bar{P}_c$ , МПа	$\bar{\rho}_c$ , кг/м <sup>3</sup>	$\alpha_R$	$b$	$B$
Астраханское	631,0	3,57	290,6	5,404	5,607	1,532
Карачаганакское	647,6	3,85	287,3	5,367	5,457	1,526
Оренбургское	527,3	2,92	263,9	5,801	6,196	1,558
Уренгойское	585,3	2,62	281,4	5,717	7,577	1,552
Шуртан	630,2	4,24	276,3	6,621	5,069	1,589

Информация о термических свойствах фракций различных газовых конденсатов на линии кипения даже в ограниченном интервале температур обычно отсутствует. Поэтому при прогнозировании псевдокритических параметров авторы настоящей статьи использовали гипотезу о неизменности группового углеводородного состава фракций, имеющих различные диапазоны выкипания. В рамках этой гипотезы целесообразно использовать модель *эквивалентного углеводорода* (эквивалентного алкана и эквивалентного нафтена). Под этим термином следует понимать такие углеводороды, которые имеют температуру кипения, близкую к температуре выкипания какой-либо фракции.

В этом случае псевдокритические свойства рекомендуется рассчитывать с использованием простых правил аддитивности для эквивалентных углеводородов:

$$\bar{T}_c = T_c^n \cdot X_n + T_c^h \cdot X_h; \quad (9)$$

$$\bar{P}_c = P_c^n \cdot X_n + P_c^h \cdot X_h; \quad (10)$$

$$\bar{\rho}_c = \rho_c^n \cdot X_n + \rho_c^h \cdot X_h, \quad (11)$$

где  $T_c^n$ ,  $T_c^h$  – критические температуры эквивалентных углеводородов (парафина и нафтена);  $P_c^n$ ,  $P_c^h$  – критические давления эквивалентных углеводородов (парафина и нафтена);  $\rho_c^n$ ,  $\rho_c^h$  – критические плотности эквивалентных углеводородов (парафина и нафтена);  $X_n$ ,  $X_h$  – мольные концентрации парафинов и нафтен в газовом конденсате.

Вычисленные значения псевдокритических параметров для фракций астраханского газоконденсата, а также значения псевдокритических температур и плотностей, рассчитанные по формулам Риози и Доуберта [12], приведены в табл. 4. Анализ приведенной информации показывает, что данные, полученные в рамках модели эквивалентных углеводородов (без привлечения эмпирической информации), хорошо согласуются с результатами расчета по формулам Риози и Доуберта.

Таблица 4

Псевдокритические параметры  
для фракций астраханского газоконденсата

Диапазон выкипания, °С	$\bar{P}_c$ , МПа	$\bar{T}_c$ , К	$\bar{\rho}_c$ , кг/м <sup>3</sup>	$\bar{T}_c$ , К [12]	$\bar{\rho}_c$ , кг/м <sup>3</sup> [12]
50	2,88	490,6	257,3	482,1	243,2
70–80	3,63	531,6	253,3	527,8	253,5
90–100	3,31	558,4	263,5	551,0	255,0
120–130	2,93	589,4	251,7	585,8	257,9
150–160	2,78	631,9	244,5	620,0	260,5
170–180	2,59	645,9	255,0	641,3	260,5
200–210	2,94	648,3	245,8	672,4	259,9

### Выводы

Авторами настоящей статьи предложена новая модель прогнозирования физико-химических свойств веществ на линии кипения – *SP-QSPR*. Показано, что при вычислении критических параметров плотности, вязкости, показателя преломления и поверхностного натяжения можно использовать такие конститутивные комплексы, как ортохор, скейлинговые значения мольной рефракции и парахора, мольный объем переохлажденной до  $T = 0$  К жидкости, а также мольный критический объем. Исследована связь между структурно-аддитивными комплексами и мольным критическим объемом, а также критическими амплитудами для разности ортобарических плотностей, поверхностного натяжения, показателя преломления. Наличие корреляций между конститутивными свойствами, критическими параметрами и амплитудами открывает широкие возможности для дальнейшего развития методологии прогнозирования свойств веществ по известным структурным элементам. Метод *SP-QSPR* позволяет на основе ограниченного объема эмпирической информации прогнозировать теплофизические свойства углеводородов и их галогенопроизводных на линии кипения практически во всем интервале параметров существования жидкой фазы.

В настоящей статье изложена новая методика прогнозирования псевдокритических параметров углеводородов, газовых конденсатов и их фракций с использованием ограниченного объема экспериментальной информации. Алгоритмы и анализ погрешности прогнозирования различных физико-химических свойств нефтепродуктов будут рассмотрены в следующих работах авторов.

### Список литературы

1. Рид Р. Свойства газов и жидкостей: пер. с англ. / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
2. Филиппов Л.П. Методы расчета и прогнозирования свойств веществ / Л.П. Филиппов. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 252 с.
3. Татевский В.М. Строение и физико-химические свойства молекул и веществ / В.М. Татевский. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 464 с.
4. Йоффе В.Б. Рефрактометрические методы химии / В.Б. Йоффе. – Л.: Химия, 1983. – 22 с.
5. Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Физико-химические свойства молекулярных соединений (экспериментальные данные и методы расчета): справ. изд. / А.Г. Морачевский, И.Б. Сладков. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Химия, 1996. – 312 с.

6. Анисимов М.А. Критические явления в жидкостях и жидких кристаллах / М.А. Анисимов. – М.: Наука, 1987. – 272 с.

7. Zhelezny V.P. The Methods of Prediction of the Properties for Substances on the Coexistence Curve Including Vicinity of the Critical Point / V.P. Zhelezny; edited by S.J. Rzoska, V.P. Zhelezny // Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Nonlinear Dielectric Phenomena in Complex Liquids, Jaszowiec-Ustron, Poland, 10–14 May 2003. – Jaszowiec-Ustron, 2003. – P. 163–175.

8. Zhelezny V.P. The Temperature Dependence of Parachor / V.P. Zhelezny, Yu.V. Semenyuk, S.N. Ancherbak, N.V. Emel'yanenko. The Temperature Dependence of Parachor // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2009. – Vol. 83 – № 2. – P. 182–186.

9. Zhelezny V.P. New vapor pressure equation for non-associated substances / V.P. Zhelezny, Y.V. Cheremnykh, E.G. Bisko // High Temps. – High Press. – 1999. – Vol. 31. – № 2. – P. 163–168.

10. Le Neindre B. Scaled equation for the coexistence curve, the capillary constant and the surface tension of n-alkanes / B. Le Neindre, Y. Garrabos // Fluid Phase Equilib. – 2002. – № 198. – P. 165–183.

11. Григорьев Б. А. Теплофизические свойства и фазовые равновесия газовых конденсатов и их фракций / Б.А. Григорьев, А.А. Герасимов, Г.А. Ланчаков; под общ. ред. Б.А. Григорьева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 344 с.

12. Riazi M.R. Simplify property predictions / M.R. Riazi, Th.E. Daubert // Hydrocarbon processing. – 1980. – Vol. 59. – P. 115–116.