

Авторефер.  
Р 49

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

РОТКОП Александр Леонидович

УДК 536.2.022+532.13:661.715

ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
И ВЯЗКОСТИ НЕЖИРНЫХ ПРОДУКТОВ И УГЛЕВОДОРОДОВ

01.04.14 - теплофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Переучет 19 87

Одесса - 1984.

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте автоматизации пищевой промышленности "Пищепромавтоматика"

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
Геллер В.З.

Официальные оппоненты - доктор технических наук  
Соловьев А.Н.  
кандидат технических наук  
Железный В.П.

Ведущее предприятие - Всесоюзный научно-исследовательский институт нефтяного машиностроения  
/г.Москва/

Защита состоится "26 октября" 1984 г. в  
10<sup>30</sup> часов на заседании специализированного совета

ском институте пищевой промышленности  
270108, Одесса, ул.Сверд-

тся в библиотеке Одесского института пищевой промышленности

26 октября 1984 г.

Г.И.ЭЛЬКИН

ОНАХТ 29.05.12  
Обобщенная методика



v014750

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Бурное развитие нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности на современном этапе осуществляется не только за счет роста производительных мощностей, но и, что не менее важно, за счет интенсификации всех производственных процессов. В связи с этим, особую актуальность приобретают вопросы получения достоверных данных по теплофизическим свойствам нефтепродуктов, используемых в при разработке, проектировании и эксплуатации промышленных установок. Знание таких свойств, как теплопроводность  $\lambda$  и вязкость  $\eta$  в широком интервале параметров состояния необходимо для решения проблем интенсификации тепло- и массообменных процессов в аппаратах добычи, транспортировки и переработки нефти.

Отсутствие строгой теории жидкого состояния не позволяет получить приемлемые, с точки зрения необходимой точности, методики для расчета коэффициентов теплопроводности и вязкости нефтей и нефтепродуктов. В связи с этим большое значение имеют экспериментальные исследования кинетических свойств нефтепродуктов и разработка расчетных методик, обобщающих экспериментальные данные.

Настоящая работа выполнена в соответствии с планом работ по комплексной проблеме "Теплофизика" АН СССР и АН УССР и координационным планом научно-исследовательских работ по проблеме "Разработка достоверных данных и создание массива стандартных справочных данных о теплофизических свойствах технически важных газов и жидкостей" на 1981-1985 г.г.

Цель работы:

1. Исследование теплопроводности и вязкости фракций ряда нефтепродуктов в широком диапазоне температур и давлений.
2. Обобщение данных и разработка обобщенной методики расчета коэффициентов теплопроводности и вязкости жидких углеводородов и нефтепродуктов, полученных из нефтей различного углеводородного состава.

Научная новизна:

1. Получены экспериментальные данные по теплопроводности и вязкости 16 фракций ромашкинской нефти, 14 дистиллятов коксования котур-телинского гудрона и 12 дистиллятов коксования котур-телинского крекинг-остатка в диапазоне темпера-

v014750

тур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+400^{\circ}\text{C}$  и давлений до 10 МПа.

2. Показано, что однопараметрический закон соответственных состояний (ОЗСС) с успехом может быть применен для обобщения данных о теплопроводности и вязкости углеводородов и нефтепродуктов, полученных из нефтей различного углеводородного состава.

3. Для ряда жидких углеводородов и нефтепродуктов предложен единый вид расчетных уравнений, представляющих собой функциональную зависимость теплопроводности и вязкости при атмосферном давлении от температуры и определяющего критерия подобия.

4. Получены уравнения, позволяющие для широкого класса неассоциированных жидкостей определить барическую зависимость приведенной теплопроводности и вязкости как функцию приведенных температуры, давления и определяющего критерия подобия.

5. Разработана методика расчета псевдокритических параметров (температуры, плотности и давления) и определяющего критерия подобия для нефтепродуктов.

Автор защищает следующие основные научные положения:

1. Для класса жидкостей, включающего углеводороды и их смеси, наблюдается подобие свойств переноса, что позволяет получить на основе однопараметрического закона соответственных состояний зависимости для теплопроводности и вязкости при введении в расчетные уравнения наряду с приведенными температурой и давлением только одного определяющего критерия подобия.

2. Применение ОЗСС в приведенной форме с использованием в качестве параметров приведения значений  $\lambda$  и  $\mu$  при атмосферном давлении позволяет получить единые барические зависимости теплопроводности и вязкости в функции приведенных температуры и давления и определяющего критерия подобия для широкого класса неассоциированных жидкостей.

3. Псевдокритические параметры (температура и давление) и значения определяющего критерия подобия, рассчитанные по предложенной методике, могут быть использованы для обобщения свойств переноса нефтепродуктов.

4. Значение определяющего критерия подобия для "гомологического" ряда фракций одной и той же нефти уменьшаются с ростом средней температуры кипения фракций. Это объясняется преобладанием в высококипящих нефтепродуктах тяжелых углево-

родов, обладающих меньшей молекулярной симметрией.

Практическая ценность. Составлены таблицы теплопроводности и вязкости ряда нефтепродуктов, необходимые для расчета процессов и аппаратов в нефтепереработке и нефтехимии.

Обоснована возможность обобщения данных о кинетических свойствах нефтепродуктов на основе ОЗСС.

Созданы и апробированы методики, позволяющие рассчитывать коэффициенты теплопроводности и вязкости ряда жидких углеводородов и нефтепродуктов при атмосферном давлении, а также приведенные коэффициенты теплопроводности и вязкости в зависимости от давления для широкого класса неассоциированных жидкостей. Методики требуют для своего использования минимальной исходной информации.

Реализация результатов работы. Методики расчета кинетических свойств углеводородов и нефтепродуктов приняты ВНИИ ГСССД для аттестации в качестве рекомендуемых расчетных методик. Методика использована рядом научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций. Справки об использовании методики прилагаются к диссертации.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены и обсуждались на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников ОТИШ им.М.В.Ломоносова (Одесса, 1980, 1983 г.г.); на выездном заседании секции теплофизических свойств веществ научно-технического совета по проблеме "Теплофизика" (Алма-Ата, 1982 г.) По результатам работы опубликовано 5 статей в периодической печати.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 294 страницах машинописного текста (из них 136 страниц приложений) и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 108 наименований и приложений.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, сформулированы задачи исследований и научная новизна полученных результатов, приведены основные научные положения, защищаемые автором.

В первой главе проведен обзор опубликованных результатов экспериментальных исследований по теплопроводности и вязкости нефтей и нефтепродуктов. Подавляющая часть экспериментальных данных получена в Грозненском нефтяном институте под руководством Ю.Л.Расторгуева и Б.А.Григорьева.

Более обширным является набор данных по теплопроводности, меньше данных по вязкости. Исследованы свойства практически всех наиболее представительных нефтей Советского Союза: озексуатской, мангышлакской, самотлорской, малгобекской, троичко-анастасьевской и др. Однако, в этом массиве отсутствуют данные по свойствам перспективной ромашкинской нефти и ее фракций. Практически отсутствуют данные по теплофизическим характеристикам продуктов вторичной переработки нефтей. Большинство исследований по теплопроводности и вязкости нефтепродуктов выполнено в диапазоне температур 20–200°C, не охватывающем всю температурную область, которая находит применение в нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности (–40 – +400°C).

Проведен анализ литературных источников, содержащих описание методов расчета кинетических свойств углеводородов и нефтепродуктов. Установлено, что многочисленные расчетные методики носят, в основном, эмпирический характер. Как правило, они получены путем аппроксимации экспериментального материала и справедливы для узкого класса веществ в ограниченном диапазоне параметров состояния.

В большинство расчетных уравнений входят параметры, зависящие от природы вещества, термические параметры ( $\rho, \nu$ ), значения  $\lambda$  и  $\eta$  при фиксированных температуре и давлении и т.д., для определения которых необходимо располагать не всегда легко доступными экспериментальными данными.

Вторая глава посвящена экспериментальному определению коэффициентов теплопроводности и вязкости фракций ромашкинской нефти и вторичных продуктов переработки нефти котур-тепинского месторождения в жидкой фазе в диапазоне температур –40 – +400°C и давлений до 10 МПа.

Исследования  $\lambda$  проводились на установках, реализующих стационарный вариант метода нагретой нити, разработанный В.З.Геллером с сотрудниками. При измерениях использовались ячейки с величиной зазора  $0,5 \cdot 10^{-3}$  и  $0,9 \cdot 10^{-3}$  м. Максимальная относительная погрешность опытных данных составляла 1,2%.

Для исследования коэффициента динамической вязкости нефтепродуктов в диапазоне температур –30 – +400°C и давлений до 10 МПа был использован метод капиллярного вискозиметра конструкции И.Ф.Голубева (У вариант). Основной объем измерений осуществлялся при помощи вискозиметров с диаметрами измерительных капилляров  $1,307 \cdot 10^{-4}$  и  $2,035 \cdot 10^{-4}$  м, а при определении вязкости нефтепродуктов со средней температурой кипения, превышающей 300°C, использовался вискозиметр с диаметром капилляра  $4,015 \cdot 10^{-4}$  м. Анализ погрешностей измерения  $\eta$  показал, что максимальная относительная погрешность не превышает 1,5%.

В третьей главе рассматривается методика обобщения экспериментальных данных по кинетическим свойствам углеводородов и нефтепродуктов на основе однопараметрического закона соответственных состояний, разработанного в цикле работ Л.П.Филиппова<sup>1/</sup> и успешно использованного им при описании термических свойств большой группы нормальных (неассоциированных) жидкостей.

ОЗСС для вязкости и теплопроводности можно записать в виде

$$\varphi(\pi, \nu, X, A) = 0, \quad (I)$$

где  $\varphi$  – универсальная функция;

$\pi = p/p_{кр}; \nu = T/T_{кр}$  – приведенные давление и температура;

$p_{кр}, T_{кр}$  – критические давление и температура;

$X$  – свойство переноса (теплопроводность, вязкость);

$A = 100\pi$  при  $\nu = 0,625$  на кривой давления насыщенных паров – определяющий критерий подобия.

Следует отметить, что исследования, проведенные Л.П.Филипповым для различных веществ, показали, что для описания кинетических свойств использование только одного критерия подобия  $A$  недостаточно и необходимо введение дополнительных критериев, учитывающих сложный механизм переноса в жидкостях.

Вместе с тем, при обработке экспериментальных данных для группы близких по структуре веществ (ряда фреонов) В.З.Геллером<sup>2/</sup> были получены хорошие корреляции для теплопроводности

1/ Филиппов Л.П. Подобие свойств веществ. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1978. – 255 с.

2/ Геллер В.З. Комплексное исследование теплофизических свойств фреонов и разработка обобщенных методов расчета и прогнозирования коэффициентов переноса. Дис...докт.техн. наук. – Казань, 1980. – 381 с.

ти и вязкости при введении в уравнение только одного определяющего параметра. Это позволяет надеяться, что для группы жидкостей с постоянным качественным составом (например, углеводородов и их смесей) можно получить достаточно хорошие корреляции для вязкости и теплопроводности на основе ОЗСС.

Для решения этой задачи применительно к нефтепродуктам необходимо знать их псевдокритические параметры и определяющий критерий подобия, входящие в зависимость (1). Точный молярный состав нефтепродуктов практически никогда не бывает известным и, поэтому, методы определения критических констант на основе информации о молярном составе к ним не применимы. В связи с этим, при определении  $T_{кр}$ ,  $\rho_{кр}$ ,  $\rho_{кр}$  и определяющего критерия  $A$  нефтепродукты рассматривались как гипотетические чистые вещества со средними молекулярной массой  $M$  и температурой кипения  $T_{кип}$ .

Для расчета псевдокритических температуры и плотности были использованы методы определения критических констант по данным на кривой упругости, полученные Л.П.Филипповым для чистых веществ.

Поскольку для нефтепродуктов, представляющих собой сложные смеси, такая информация отсутствует, в работе показано, что можно использовать данные по ортобарической плотности, имеющиеся в литературе (либо полученные экспериментальным путем без особых затруднений). В области линейной зависимости  $\rho(T)$   $T_{кр}$  и  $\rho_{кр}$  определялись из уравнений

$$T_{кр} = 0,493 \left[ T - \frac{\rho(T_1 - T_2)}{\rho_1 - \rho_2} \right], \quad (2)$$

$$\rho_{кр} = 0,253 \left[ \rho - \frac{T(\rho_1 - \rho_2)}{T_1 - T_2} \right], \quad (3)$$

где  $\rho_1, \rho_2$  - значения плотности, соответственно, при  $T_1$  и  $T_2$ ;  $\rho, T$  - любая пара  $\rho, T_1$  или  $\rho_2, T_2$ .

Псевдокритическое давление определялось из уравнения, связывающего  $\rho_{кр}$ ,  $T_{кр}$  с плотностью при нормальной температуре кипения  $\rho_{кип}$  и термодинамическим фактором корреляции  $\beta$

$$\rho_{кр} (6,52 + 1,075\beta) = \frac{\rho_{кип} T_{кр}}{10^6 M}, \quad (4)$$

где  $\beta = [T_{кип} / (T_{кр} - T_{кип})] \lg(9,87\rho)$ .

Для расчета критерия  $A$  по известным значениям  $T_{кр}$ ,  $\rho_{кр}$ ,  $\rho_{кр}$  использовалась полученная Л.П.Филипповым зависимость критической сжимаемости  $Z_{кр} = 10^6 M / \rho_{кр} R T_{кр} \rho_{кр}$  от логарифма определяющего критерия подобия

$$\frac{1}{Z_{кр}} = 3,92 - 0,85 \lg A. \quad (5)$$

В качестве исходных данных при расчете по уравнениям (2) - (5) использовались средняя молекулярная масса, температура кипения, два значения ортобарической плотности и плотность при температуре кипения. Контрольные расчеты, выполненные по (2) - (5) для ряда предельных, непредельных и ароматических углеводородов, показали достаточно хорошее согласование с экспериментом - по  $T_{кр}$ ,  $\rho_{кр}$ ,  $\rho_{кр}$  и  $A$  расхождения не превышают 1,3 - 4%.

На рис. приведена зависимость определяющего критерия подобия  $A$  от средней температуры кипения для фракций мангышлакской, самотлорской и ромашкинской нефти.

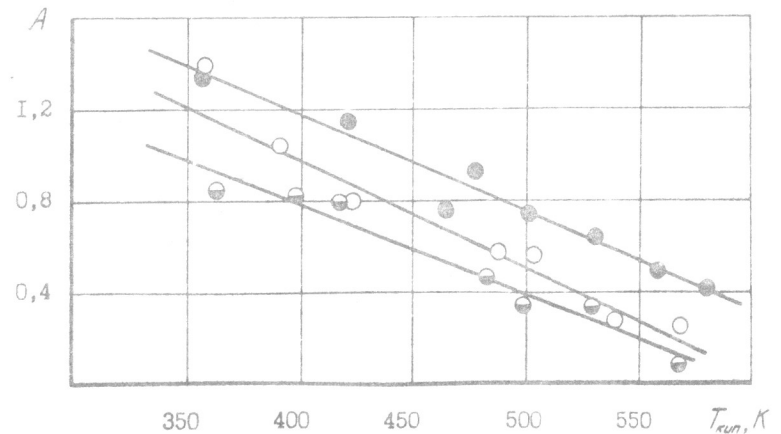


Рис. Зависимость определяющего критерия  $A$  от температуры кипения

- - фракции ромашкинской нефти;
- - фракции самотлорской нефти;
- ◐ - фракции мангышлакской нефти.

Установлено, что с увеличением  $T_{кип}$  значения критерия  $A$  монотонно убывают, что согласуется с выводами Л.П. Филиппова об уменьшении значений определяющего критерия для членов гомологических рядов углеводородов (от низших к высшим) и объясняется тем, что критерий  $A$  является мерой "компактности" и симметрии молекул и уменьшение "компактности" и симметрии в пределах гомологического ряда приводит к уменьшению определяющего критерия. Как видно из рис., наименьшим значением

$A$  при  $T_{кип} = const$  обладают фракции мангышлакской нефти, поскольку из рассматриваемых нефтепродуктов в мангышлакской нефти наибольшее содержание парафиновых углеводородов. Так как парафиновые углеводороды обладают менее симметричной структурой молекул, чем нафтеновые и ароматические, они при прочих равных условиях имеют более низкие значения  $A$ .

При обработке экспериментальных данных по теплопроводности и вязкости в виде (I) были получены два вида зависимостей: зависимости теплопроводности  $\lambda_s$  и вязкости  $\eta_s$  на линии насыщения (и при атмосферном давлении<sup>1/</sup>) в функции от  $\tau$  и  $A$  и барические зависимости  $\lambda^* = \lambda_s / \lambda_s$  и  $\eta^* = \eta_s / \eta_s$  в функции от  $\tau$  и  $A$ .

Для теплопроводности  $\lambda_s$  предельных (от нонана до эйкозана) углеводородов и фракций ромашкинской и мангышлакской нефти<sup>2/</sup> получены зависимости вида

$$\lambda_s = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{ij} A^i \tau^j \quad (6)$$

Для углеводородов  $n = 1$ ,  $m = 1$ , коэффициенты  $a_{00} = 0,206025$ ;  $a_{01} = -0,130542$ ;  $a_{10} = 0,172130 \cdot 10^{-3}$ ;  $a_{11} = -0,025418$ .

Для нефтяных фракций  $n = 2$ ,  $m = 1$ , коэффициенты  $a_{00} = 0,185670$ ;  $a_{01} = -0,128972$ ;  $a_{10} = -0,037531$ ;  $a_{11} = 0,031435$ ;  $a_{20} = 0,032386$ ;  $a_{21} = -0,032526$ .

Для вязкости  $\eta_s$  предельных (от нонана до эйкозана), ароматических (толуола, м-ксилола, п-ксилола) углеводородов и

1/ При температурах нормального кипения значения коэффициентов теплопроводности и вязкости на линии насыщения практически совпадают со значениями при атмосферном давлении.

2/ Фракции ромашкинской нефти: НК-120; 120-180; 140-240; 195-270; 240-350; 180-240; 240-280; 280-350°C и мангышлакской: 130-140; 160-170; 240-350; 280-290°C.

фракций ромашкинской и самотлорской нефтей<sup>3/</sup> получена зависимость вида

$$\ln \eta_s = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m b_{ij} \frac{A^i}{\tau^j} \quad (7)$$

Для углеводородов  $n = 2$ ,  $m = 3$ , для нефтяных фракций  $n = 2$ ,  $m = 3$ , при их совместном описании  $n = 3$ ,  $m = 3$ . Коэффициенты уравнения (7) приведены в табл. I.

Таблица I  
Коэффициенты уравнения (7)

Индекс $i, j$	Углеводороды	Нефтяные фракции	Совместная аппроксимация
0,0	-8,019063	13,178681	7,106000
0,1	-15,688933	-90,194595	-76,034899
0,2	20,330208	111,167290	54,054260
0,3	-7,610838	-43,680738	-2,713199
1,0	-1,522564	-24,395104	-26,254727
1,1	17,200567	99,054928	116,059240
1,2	-22,472564	-122,799780	-76,222174
1,3	8,476593	48,318701	-1,347807
2,0	1,105281	7,184832	14,296454
2,1	-4,785372	-26,837760	-57,325318
2,2	5,947827	33,135512	32,915495
2,3	-2,216339	-13,018600	4,640432
3,0	-	-	-2,296828
3,1	-	-	9,050281
3,2	-	-	-4,163291
3,3	-	-	-1,631868

Для широкого класса неассоциированных жидкостей, включающего жидкий кислород и азот, ряд фреонов, предельные углеводороды и фракции нефтей и охватывающих диапазон изменения критерия  $A$  от 0,2 до 3,7 были получены барические зависимости  $\lambda^*$  и  $\eta^*$  вида

1/ Фракции ромашкинской нефти: НК-120, 120-180, 140-240, 195-270, 240-350°C и самотлорской: НК-62, НК-120, НК-180, 62-85, 62-140°C.

$$\lambda^* = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sum_{k=0}^2 \alpha_{ijk} \left(\frac{\pi}{10}\right)^j A^{3k}; \quad (8)$$

$$\eta^* = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^2 \beta_{ijk} \pi^k A^{2k}. \quad (9)$$

Коэффициенты уравнений (8) и (9) приведены в табл.2 и 3

Таблица 2

Коэффициенты уравнения (8)

$i, j, k$	$\alpha_{ijk}$	$i, j, k$	$\alpha_{ijk}$	$i, j, k$	$\alpha_{ijk}$
0,0,0	1,033137	1,0,0	-0,072698	2,0,0	0,035917
0,0,1	0,062911	1,0,1	-0,246112	2,0,1	0,214614
0,0,2	-0,056664	1,0,2	0,195652	2,0,2	-0,160376
0,1,0	-0,042525	1,1,0	-0,170563	2,1,0	0,520082
0,1,1	-1,231135	1,1,1	4,265238	2,1,1	-3,400626
0,1,2	0,854318	1,1,2	-2,844957	2,1,2	2,344183
0,2,0	0,188291	1,2,0	0,005135	2,2,0	-0,357309
0,2,1	1,595138	1,2,1	-5,933083	2,2,1	4,960615
0,2,2	-0,770308	1,2,2	2,798562	2,2,2	-2,353337
0,3,0	-0,134344	1,3,0	0,215544	2,3,0	-0,053873
0,3,1	-0,299038	1,3,1	1,258347	2,3,1	-1,087439
0,3,2	0,147396	1,3,2	-0,589045	2,3,2	0,510477

Таблица 3

Коэффициенты уравнения (9)

$i, j, k$	$\beta_{ijk} \cdot 10^2$	$i, j, k$	$\beta_{ijk} \cdot 10^2$	$i, j, k$	$\beta_{ijk} \cdot 10^2$
0,0,0	99,864660	0,1,2	-1,984608	1,0,3	-0,680141
0,0,1	11,428174	0,1,3	0,118707	1,1,0	4,988453
0,0,2	-5,054444	1,0,0	5,173479	1,1,1	-7,339357
0,0,3	0,328197	1,0,1	-27,694762	1,1,2	2,911094
0,1,0	-0,850604	1,0,2	10,779750	1,1,3	-0,176683
0,1,1	5,807500				

В табл. 4 указаны области применимости расчетных уравнений, а также максимальные и среднеквадратичные погрешности расчета вязкости и теплопроводности.

Таблица 4

К аттестации расчетных методик

Вещества	Определяемые свойства	Области изменения параметров			Погрешности, %	
		$\tau$	$\pi$	$A$	макс.	ср.квдр.
Углеводороды	$\eta_s(T)$	0,42-0,75	-	0,20-1,30	4,5	1,5
		0,40-0,80	-	0,20-0,87	1,5	0,3
Нефтепродукты	$\eta_s(T)$	0,45-0,65	-	0,50-1,40	4,7	2,1
		0,35-0,69	-	0,20-1,30	2,9	0,8
Неассоциированные жидкости	$\lambda(\rho, T)$	0,45-0,87	0,1-40	0,20-3,70	9,3	2,1
		0,42-0,70	0,1-30	0,50-3,50	2,3	0,6

С целью автоматизации расчетов по методике (2)-(9) разработана программа для ЭВМ на стандартном алгоритмическом языке ФОРТРАН.

В четвертой главе проведено сравнение экспериментальных данных по теплопроводности и вязкости углеводородов и нефтепродуктов с рассчитанными по предлагаемой методике.

Подробно рассмотрены вопросы расчета кинетических свойств для нефтепродуктов, не вошедших при разработке методики в исходный массив экспериментальных данных. Несмотря на то, что численные значения коэффициентов уравнений (6)-(9) получены путем статистической обработки экспериментальных данных определенной группы веществ, ОЗСС, положенный в основу методики, позволяет надеяться, что полученные уравнения пригодны и для описания кинетических свойств веществ, термодинамически подобных тем веществам, которые вошли в обработку.

Для проверки этого положения из литературных источников были выбраны экспериментальные данные по теплопроводности фракций сзексуатской, малгобекской, самотлорской и мангильской нефти и вязкости фракций сзексуатской нефти. При этом значения  $\tau$  и  $A$  лежали в диапазоне применимости уравнений

(6) и (7). Проведенные расчеты показали, что зависимости (6) и (7) можно использовать для получения оценочных значений  $\lambda$  (с погрешностью  $\sim 2-5\%$ ) и  $\eta$  (с погрешностью  $\sim 3-8\%$ ) по новым (ранее не включенным в обработку) нефтепродуктам. Для обеспечения возможности более точных расчетов следует, с использованием ограниченного массива новых экспериментальных данных, провести настройку (адаптацию) зависимостей вида (6) и (7), в результате которой будут получены новые значения коэффициентов. Подобная адаптация зависимостей вида (6), (7) возможна и для нефтепродуктов, значения  $\tau$  и  $A$  которых не лежат в диапазоне применимости уравнений (6) и (7).

Для определения коэффициентов уравнений переноса по ограниченной серии экспериментальных данных была разработана и реализована на ЭМ программа для определения коэффициентов полинома вида

$$y = \sum_{m_1}^{M_1} \sum_{m_2}^{M_2} \dots \sum_{m_N}^{M_N} a_{m_1, m_2, \dots, m_N} \cdot X_{n_1}^{l_1, m_1} \cdot X_{n_2}^{l_2, m_2} \cdot \dots \cdot X_{n_N}^{l_N, m_N}, \quad (10)$$

- где  $N$  - число сумм;  
 $m, M$  - нижние и верхние границы сумм;  
 $a$  - коэффициенты полинома;  
 $X$  - независимые переменные ( $\tau, \pi, A$ );  
 $y$  - свойства переноса;  
 $l$  - показатели степени;  
 $\ell$  - множители при показателях степени.

С целью проверки эффективности методов адаптации коэффициентов уравнений вида (6) и (7) был проведен контрольный эксперимент. Для исследования были выбраны пять образцов тяжелых нефтепродуктов, у которых значения  $A$  и  $\tau$  выходят из диапазона применимости уравнения (7), и методом капиллярного вискозиметра измерена вязкость при атмосферном давлении в диапазоне температур 20 - 300°C. Затем на ЭМ были определены коэффициенты (10) для  $N = 2$ ,  $m_1 = m_2 = 0$ ,  $M_1 = 2$ ,

$M_2 = 3$  (см. (7)), и получены аналитические решения, среднеквадратическая погрешность которых составила 2,7%.

В работе рассмотрены перспективы использования обобщенной методики определения кинетических свойств углеводородов и нефтепродуктов при создании банка данных по теплофизическим свойствам веществ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа опубликованных данных о переносных свойствах нефтепродуктов и существующих методик их расчета сформулированы задачи настоящей работы, заключающиеся в экспериментальном изучении теплопроводности и вязкости группы нефтепродуктов и обобщении всей доступной информации методами теории подобия.

2. Исследована теплопроводность и вязкость фракций ромашинской нефти, дистиллятов коксования котур-тепного гудрона и котур-тепного крекинг-остатка в интервале температур -40...400°C и давлений до 10 МПа. Составлены таблицы коэффициентов переноса, которые могут быть использованы при инженерных расчетах.

3. В качестве основы для обобщения данных о свойствах переноса нефтепродуктов предложено использовать однопараметрический закон соответственных состояний. На базе ОБСС разработана расчетная методика определения псевдокритических параметров  $T_{cp}$ ,  $\rho_{cp}$ ,  $\rho_{cp}$  и определяющего критерия  $A$  для нефтепродуктов. В качестве исходных параметров для определения  $T_{cp}$ ,  $\rho_{cp}$ ,  $\rho_{cp}$  и  $A$  используются средняя молекулярная масса, средняя температура кипения, два значения плотности при атмосферном давлении и температурах ниже температуры нормального кипения и плотность при температуре нормального кипения.

Контрольные расчеты показали, что для углеводородов максимальная ошибка определения  $T_{cp}$ ,  $\rho_{cp}$  и  $\rho_{cp}$  не превышает 3,6; 2,9 и 5,4%, соответственно, средняя - 1-2%.

4. На основе ОБСС разработана единая методика расчета температурной зависимости динамической вязкости и теплопроводности жидких углеводородов и нефтепродуктов вдоль линии насыщения.

5. Для широкого класса жидкостей от кислорода ( $A = 3,68$ ) до н-эйкозана ( $A = 0,2$ ), охватывающего практически весь диапазон изменения определяющего критерия  $A$ , получены уравнения для расчета барической зависимости вязкости и теплопроводности как функции от приведенных температур, давлений и определяющего критерия.

6. С привлечением широкого экспериментального материала

