

РАДИАЦИОННО-КОНДУКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛА ВБЛИЗИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ Н-ГЕКСАНА

¹С.Н. Михайлова, ¹В.К. Панфилович, ¹Ф.М. Гумеров, ¹В.А. Аляев,
²Б. Ле Нейндр

¹Казанский государственный технологический университет, Казань, Россия

²LIMHP CNRS, Université Paris Nord, Villetaneuse, France

Поступила в редакцию 01.02.2007 г.

Приведены результаты экспериментального исследования параметра $\chi = (\lambda_{эф}/\lambda_k)$ вблизи критической точки н-гексана. Для измерений использован метод плоского слоя с интерферометрической визуализацией. В непосредственной близости к критической точке установлено значительное снижение доли радиационного переноса тепла по мере приближения к $T_{кр}$ как со стороны жидкого, так и сверхкритического флюидного состояний.

Ключевые слова: радиационно-кондуктивный перенос тепла, критическая точка, сверхкритический флюид.

ВВЕДЕНИЕ

В полупрозрачных органических средах, особенно при повышенных температурах, в полной, или так называемой эффективной, теплопроводности ($\lambda_{эф} = \lambda_k + \lambda_p$) радиационная составляющая (λ_p) становится сопоставимой с кондуктивной составляющей (λ_k) [1]. Учитывая широкое применение углеводородных сред в промышленных установках, реализующих в том числе и сверхкритические флюидные (СКФ) технологии, а также практическое отсутствие информации относительно поведения радиационной составляющей теплопроводности в непосредственной близости к критической точке, следует признать особую актуальность ее исследования.

В настоящей работе проведено исследование поведения параметра $\chi = (\lambda_{эф}/\lambda_k)$ в окрестности критической точки н-гексана ($T_{кр} = 507,85$ К, $P_{кр} = 3,031$ МПа). При этом для измерений использован метод плоского слоя в сочетании с интерферометрической визуализацией [2], позволяющей легко фиксировать наличие различных возмущающих факторов (конвекции, термодиффузии, нарушений температурного поля на границах измерительного узла и др.).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальная установка (рис. 1) включает измерительный узел, интерферометр, системы заполнения измерительного узла исследуемой средой, термостатирования и измерения температуры, создания и регулирования давления.

В измерительном узле (рис. 2) реализована модель бесконечно плоского слоя. Толщина горизонтального слоя, образованного параллельными пластинами 2 и 3 со степенями черноты граничных поверхностей $\varepsilon = 0,25$, составляла 5,32 мм.

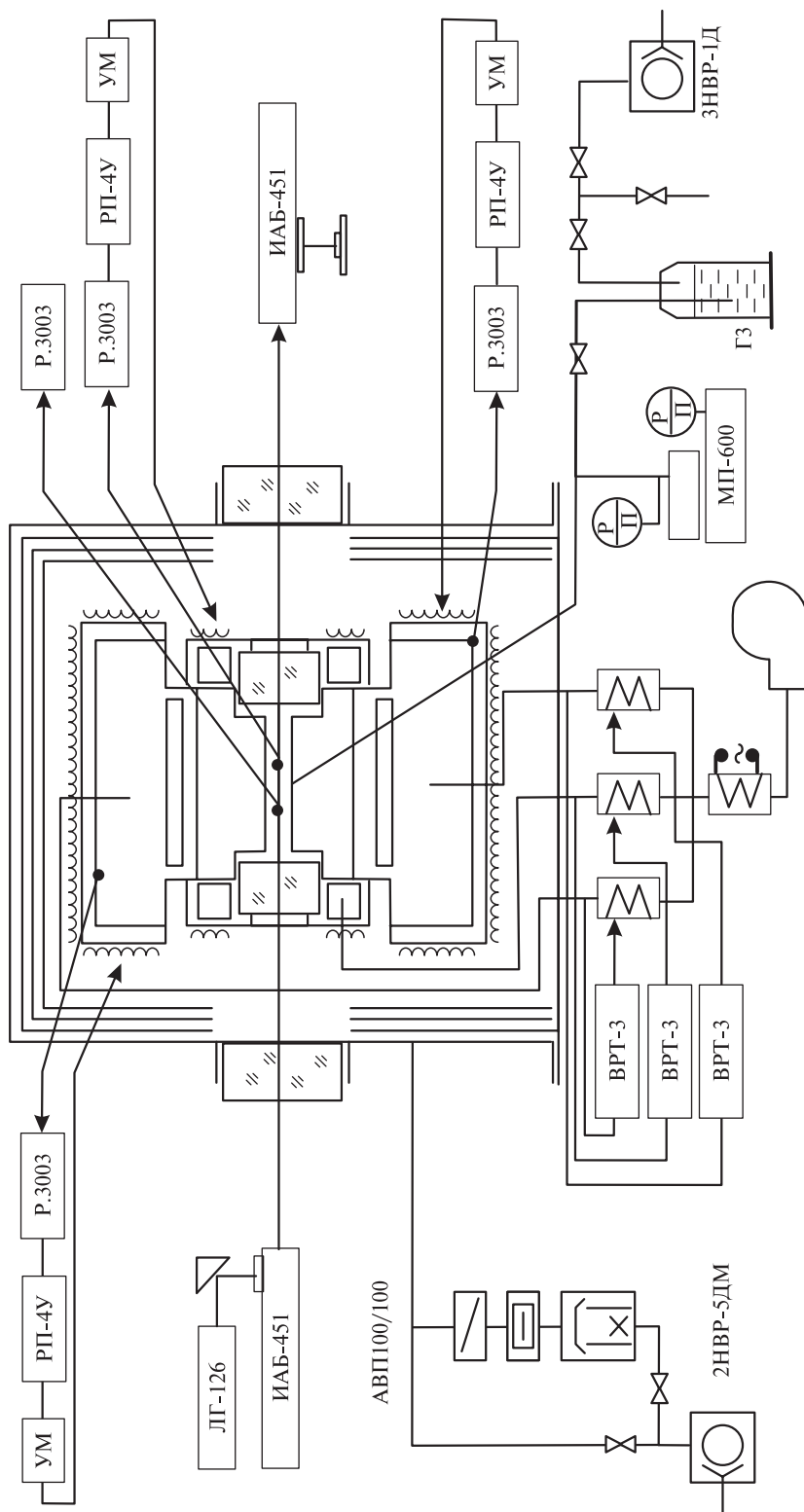


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

ИАБ-451 — интерферометр; ЛГ-126 — гелий-неоновый лазер; Р.3003 — компаратор напряжения; РП-4У — регулятор температуры; УМ — усилитель мощности; ВРТ-3 — регулятор температуры; АВП-100/100 — высоковакуумный агрегат; 2НВР-5ДМ, 3НВР-1Д — механические вакуумные насосы; МП-600 — грузопоршневой манометр; ГЗ — гидрозатвор

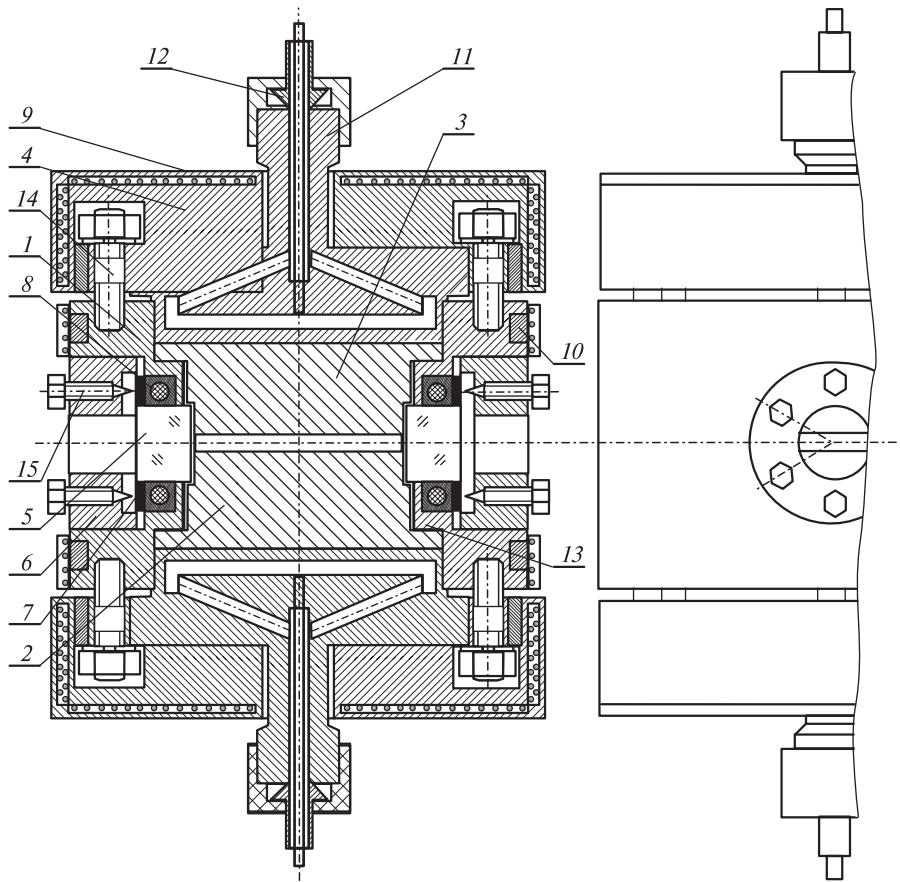


Рис. 2. Схема измерительного узла:

1 — цилиндрический корпус; 2 и 3 — нижняя и верхняя пластины; 4 — корпус охранного нагревателя; 5 — оптические окна; 6 — нажимная втулка; 7 — уплотнительное кольцо; 8 — прокладки; 9 и 10 — охранные нагреватели; 11 — фланцы; 12 — ниппельное уплотнение; 13 — уплотнение типа «зуб-канавка» с медной прокладкой; 14 — резьбовые соединения; 15 — винты

Оптическая система, изображенная на рис. 3, включает в себя двухлучевой дифракционный интерферометр, созданный на базе теневого прибора Теплера ИАБ-451, и оптический квантовый генератор ЛГ-126 с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм. При этом интерферометр был настроен на полосы конечной ширины. Выбор именно этой настройки был обусловлен отсутствием возможности осуществлять юстировку оптических окон в процессе проведения эксперимента.

Для обработки интерферограмм с целью определения параметров радиационно-кондуктивного переноса тепла (РКПТ) за основу было взято уравнение идеального интерферометра, справедливое при малых градиентах показателя преломления [2]. Это уравнение получено в предположении прямолинейности траектории измерительного луча:

$$S = \frac{l}{\lambda} \frac{\partial n}{\partial T} \int_{T_\infty}^{T_i} \partial T, \quad (1)$$

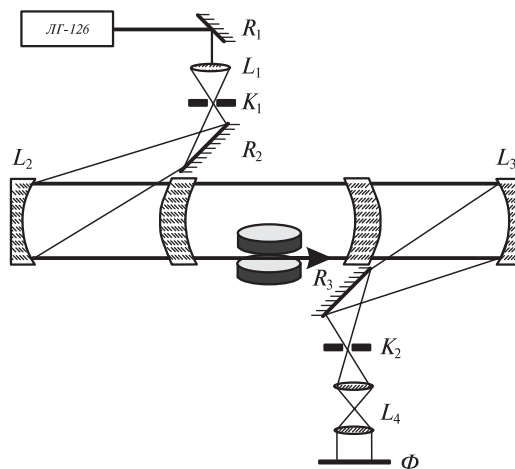


Рис. 3. Оптическая схема установки:

ЛГ-126 — гелий-неоновый лазер; R_1 — преломляющее зеркало; L_1 — расширяющая линза; K_1 — дифракционная решетка осветительной части; R_2, R_3 — диагональные зеркала интерферометра; L_2, L_3 — большие зеркала интерферометра; K_2 — дифракционная решетка приемной части; L_4 — объектив оптического прибора; Φ — фотокамера в плоскости изображения

где l — длина исследуемой модели по ходу луча; $\frac{\partial n}{\partial t}$ — температурный коэффициент показателя преломления; T_i — температура в i -й точке фазового объекта; T_∞ — температура в невозмущенной части фазового объекта.

Погрешность, вызываемая этим допущением, оценивалась путем расчета поправок и анализа их влияния на конечный результат. Из-за малых градиентов температуры поправки были незначительными.

Подробное описание данного метода исследования приведено в работах [2—4].

Вклад излучения в полный тепловой поток, представляемый в виде отношения χ — полного теплового потока к его средней интегральной кондуктивной составляющей, в конечном счете выражается с помощью параметров зафиксированных интерферограмм (рис. 4, 5) следующим образом:

$$\chi = \frac{q}{q_k} = \frac{\lambda_{эф}}{\lambda_k} = \frac{\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_{cm} + \frac{\bar{S}_y}{\bar{S}_x}}{(1 - \alpha) \cdot \left[\frac{x(H)}{H} + \frac{\bar{S}_y}{\bar{S}_x}\right]}, \quad (2)$$

где $\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_{cm}$ — тангенс угла наклона интерференционной полосы у стенки; $x(H)$ —

горизонтальная проекция интерференционной полосы; H — толщина слоя исследуемой среды; \bar{S}_y, \bar{S}_x — суммы проекций векторов плотности интерференционных полос, создаваемых компенсаторами либо оптическими окнами измерительного узла, на соответствующие координатные оси; α — доля плотности радиационного потока от граничных поверхностей в полном тепловом потоке.

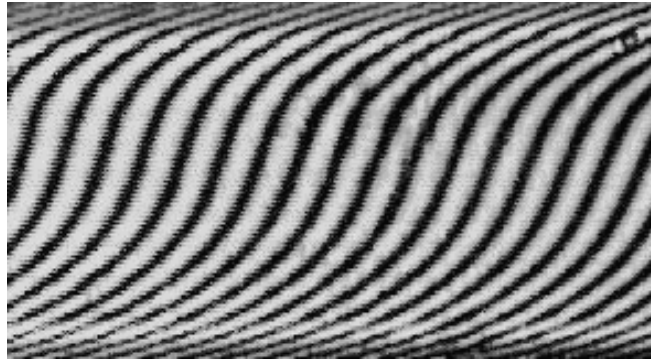


Рис. 4. Фотография интерферограммы

При умеренных температурах доля радиационного потока от стенки (рис. 6) мала, следовательно $(1 - \alpha)$ стремится к единице. При высоких температурах (свыше 373 К) величина α становится существенной, и пренебречь ею невозможно. По мере роста температуры радиационные и кондуктивные потоки тепла в среде становятся количественно сопоставимы.

Соотношение (2) позволяет расшифровывать интерферограммы, полученные при любых линейных фазовых искажениях, связанных с настройкой интерферометра: либо взаимонепараллельной установкой оптических окон, либо использованием оптических компенсаторов, расширяющих рабочий диапазон прибора ИАБ-451.

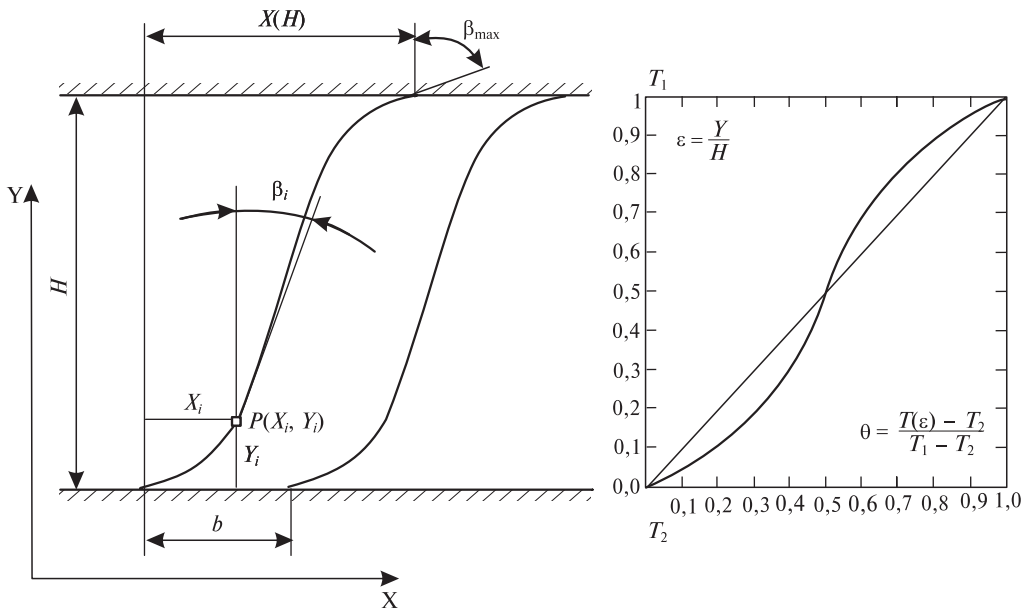


Рис. 5. Характеристики интерференционных полос в плоском слое исследуемой среды: T_1 и T_2 — температуры на границах слоя; H — толщина слоя; β — угол наклона интерференционной полосы; P — произвольная точка на интерференционной полосе с координатами (X_i, Y_i) ; β_i — угол наклона интерференционной полосы в точке P ; β_{\max} — угол наклона интерференционной полосы на границе слоя

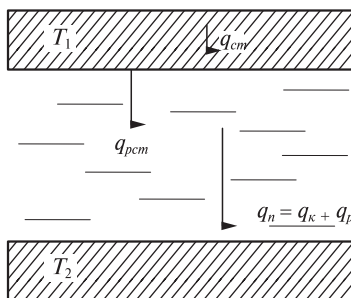


Рис. 6. Распределение тепловых потоков в плоском слое исследуемой среды:

T_1 и T_2 — температуры на границах слоя; q_{cm} — полный тепловой поток от верхней стенки; $q_{рст}$ — радиационный тепловой поток от той же верхней стенки; q_n — полный тепловой поток в слое среды, складывающийся из кондуктивной (q_k) и радиационной (q_p) составляющих

Подробное описание методики расшифровки интерферограмм приведено в работе [5].

В рамках приближения модели бесконечного плоского слоя эффективный тепловой поток в любой точке поперечного сечения слоя считается постоянным (рис. 6), в то время как значения тепловых потоков q_p и q_k переменны. На рис. 7 приведено распределение составляющих полного теплового потока по толщине слоя, процедура получения которого подробно описана в публикациях [3–5]. Максимальное

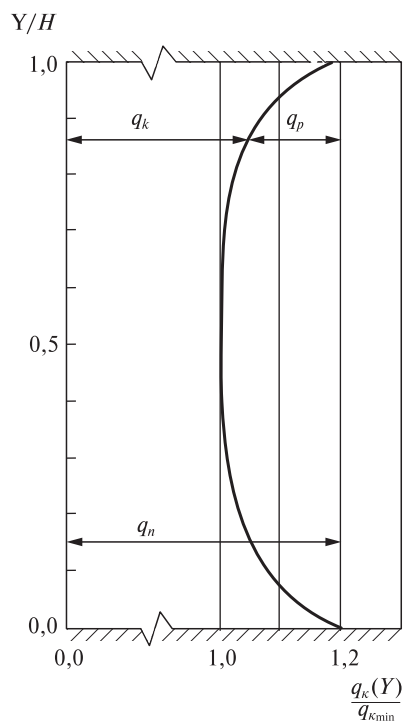


Рис. 7. Распределение составляющих полного теплового потока q_k и q_p по толщине плоского слоя

Таблица 1

Температурная зависимость коэффициента α для *n*-гексана

T , К	508,2	508,25	510,25	511,20	517,20
α	0,163	0,163	0,166	0,168	0,175

значение радиационного потока отмечено в центре слоя, а максимум кондуктивного потока наблюдался, естественно, на границах стенка — жидкость.

В таблице 1 приведены значения α для сверхкритической области *n*-гексана, полученные численным решением системы интегродифференциальных уравнений радиационно-кондуктивного переноса тепла. Для вычислений были использованы экспериментальные данные по спектральным коэффициентам поглощения. Необходимые значения показателя преломления были рассчитаны по приближенной формуле Крамерса — Кронига. Методика и результаты анализа подробно представлены в монографии [6].

Исследования в области жидкого состояния проведены в температурном диапазоне $504,5 \div 507,0$ К и интервале давлений $3,08 \div 3,55$ МПа. Измерения в сверхкритической области реализованы в интервале температур $507,75 \div 517,2$ К на изобарах: 3,11; 3,19; 3,24; 3,44; 3,59; 3,77; 3,82; 4,18 МПа. При этом толщина горизонтального плоского слоя во всех случаях составляла 5,32 мм, а степень черноты поверхностей, формировавших плоский слой, была равной 0,25.

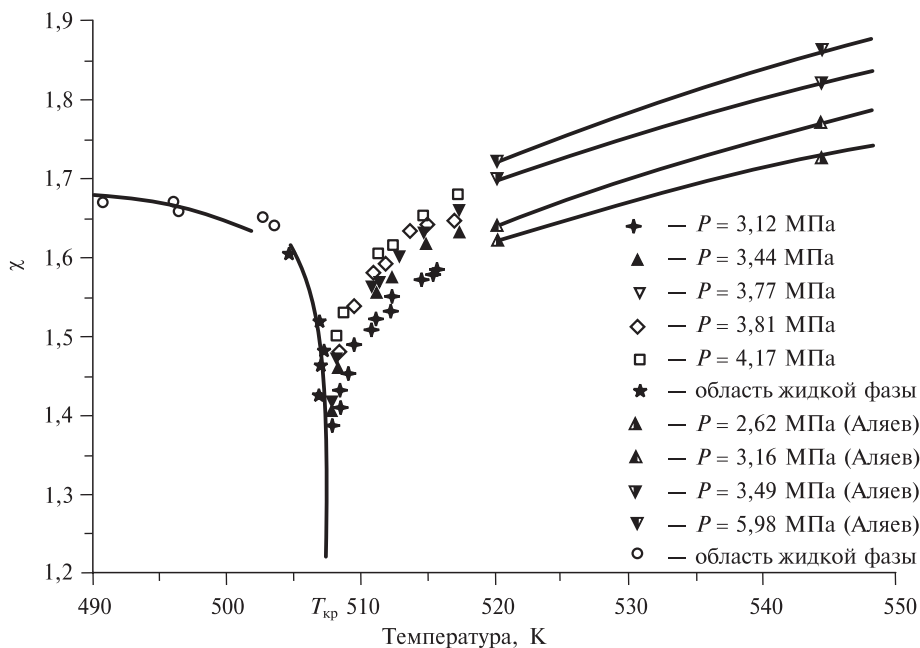


Рис. 8. Поведение χ в околкритической области *n*-гексана для толщины слоя 5,32 мм и степени черноты поверхностей 0,25

Таблица 2

Значения χ для плоского горизонтального слоя н-гексана на близких к критической точке изобарах (толщина слоя 5,32 мм, степень черноты поверхности 0,25)

P , МПа	T , К	χ	P , МПа	T , К	χ
3,10	508,20	1,409	3,20	511,25	1,525
3,11	508,25	1,432	3,19	511,50	1,532
3,11	508,60	1,450	3,20	511,50	1,535
3,11	508,80	1,455	3,17	512,20	1,555
3,11	509,50	1,489	3,17	513,73	1,580
3,12	510,85	1,510	3,19	515,20	1,580
3,13	511,25	1,515	3,16	515,20	1,583
3,12	511,25	1,520	3,23	508,20	1,439
3,12	512,05	1,533	3,24	508,20	1,445
3,14	512,20	1,552	3,23	508,80	1,464
3,14	512,20	1,549	3,25	510,85	1,520
3,12	514,50	1,570	3,24	511,25	1,525
3,12	515,20	1,575	3,24	511,25	1,525
3,14	515,50	1,579	3,24	512,00	1,546
3,20	508,20	1,419	3,25	512,20	1,550
3,19	508,20	1,424	3,23	512,20	1,548
3,20	508,60	1,452	3,26	513,75	1,580
3,19	508,80	1,468	3,24	515,50	1,590
3,20	509,50	1,489	3,23	517,20	1,600
3,20	510,85	1,525	3,23	517,20	1,604

Погрешность измерения χ в исследуемом диапазоне параметров состояния составляет $2,2 \div 4,5$ %. Результаты измерений приведены на рис. 8 и в таблице 2. На рис. 8 приведены также данные, полученные ранее в работе [1].

В жидком слое н-гексана с ростом температуры вплоть до субкритических значений имеет место значительное увеличение доли радиационной составляющей теплового потока [1]. Начиная с температур ниже критических на $10 \div 15$ К, наблюдается некоторое снижение χ , особенно проявляющееся в непосредственной близости к критической точке. Аналогичная тенденция к снижению χ наблюдается по мере приближения к критической точке со стороны сверхкритического флюидного состояния. При этом если в области температур ниже критической влияния давления на χ не обнаружено, то в сверхкритической области зависимость χ от давления значительна. Последний факт обусловлен, прежде всего, сильным влиянием давления на кондуктивную составляющую теплопроводности и оптическую плотность среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аляев В. А., Ветошкин В. Н., Усманов А. Г., Яновский Л. С. ТВТ. 1990. Т. 28. № 6. С. 1189.
2. Хауф В., Григуль У. Оптические методы в теплопередаче. М.: Мир, 1973. 238 с.
3. Ветошкин В. Н., Ветошкина Л. Г., Сулейманова Л. Л., Усманов А. Г. Казань, 1987. 23 с. Деп. в ОНИИТЭхим, г. Черкассы, № 210-ХП.

4. Ветошкин В. Н., Аляев В. А., Ветошкина Л. Г. Казань, 1987. 12 с. Деп. в ОНИИТЭхим, г. Черкассы, № 271-ХП.
 5. Михайлова С. Н. Кандидатская диссертация. Казань, 1999. 143 с.
 6. Аляев В. А., Панфилович К. Б. Радиационно-кондуктивный теплообмен в полупрозрачных органических жидкостях. Изд-во КГУ, 2003. 196 с.
-
-

**RADIATION-CONDUCTION HEAT TRANSFER
ABOUT A CRITICAL POINT OF N-HEXANE**

**¹S.N. Mikhailova, ¹V.K. Panfilovich, ¹F.M. Gumerov, ¹V.A. Alyaev,
²B. Le Neindre**

*¹Kazan State Technical University, Kazan, Russia
²LIMHP CNRS, Universite Paris Nord, Villetaneuse, France*

The results of experimental study of the parameter $\chi = (\lambda_{eff}/\lambda_{cond})$ about a critical point of n-hexane are presented. The measurements are made using the flat layer method with interference visualization. A crucial decrease in the fraction of radiation heat transfer is established as temperature is approaching the critical point from both liquid and supercritical fluid state sides.

Key words: radiation-conduction heat transfer, critical point, supercritical fluid.
