

03;07;12

## Исследование свободно-конвективной струи методом голографической интерферометрии

© Н.М. Ганжерли, И.А. Маурер, Д.Ф. Черных

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: nina@holo.ioffe.rssi.ru

(Поступило в Редакцию 9 апреля 2001 г. В окончательной редакции 1 июня 2001 г.)

Методом голографической интерферометрии реального времени проведено исследование процесса развития свободно-конвективной струи в замкнутой полости, заполняемой различными жидкостями, под действием линейного источника тепла и источника, близкого к точечному. Измерены характерные времена процесса. Построены поля температуры и профили температуры в струе.

### Введение

Нестационарные процессы в теплопереносе относятся к сложным физическим явлениям, при которых в жидкости или газе возникает течение, носящее характер неустановившегося как во времени, так и по пространству, занятому потоком. Математическое моделирование таких процессов приводит к системе нелинейных дифференциальных уравнений, при этом краевые условия сами являются дифференциальными уравнениями. Целью моделирования является получение картины нестационарных полей температуры и скоростей в потоке. Экспериментальное исследование позволяет уточнить математическую модель, приблизив ее к исследуемому физическому объекту [1]. Изучение нестационарных процессов контактными датчиками, например, с помощью густой сетки зондов затруднено, поскольку зонды вносят помехи в ход процесса. Кроме того, скорость опроса датчиков ограничивает максимально регистрируемую скорость развития нестационарного процесса. Поэтому при исследовании теплопереноса особый интерес представляют неконтактные оптические методы [2,3], к которым относятся и интерференционно-голографические, существенно расширяющие возможности оптического эксперимента по визуализации фазовых неоднородностей [4,5]. При прохождении света через объекты с фазовыми неоднородностями возникает дополнительная оптическая разность хода, связанная с изменением в ходе процесса показателя преломления в толще слоя. Это изменение приводит к дополнительному набегу фазы световой волны  $\Delta\varphi(x, y)$ , определяемому выражением

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_l [n(x, y, z) - n_0] dl, \quad (1)$$

где  $x, y$  — координаты точки в плоскости наблюдения;  $\lambda$  — длина волны света,  $n_0$  — показатель преломления фазового объекта в невозмущенном состоянии в начальный момент времени;  $n(x, y, z)$  — распределение показателя преломления в объекте в момент регистрации интерферограммы;  $l$  — траектория луча света в объекте.

Дополнительный набег фазы регистрируется интерференционной картиной переводом набега фазы в модуляцию интенсивности. По величине  $\Delta\varphi(x, y)$  можно оценить распределение показателя преломления  $n(x, y, z)$  и связанные с ним распределения таких параметров фазового объекта, как плотность, температура и т. д.

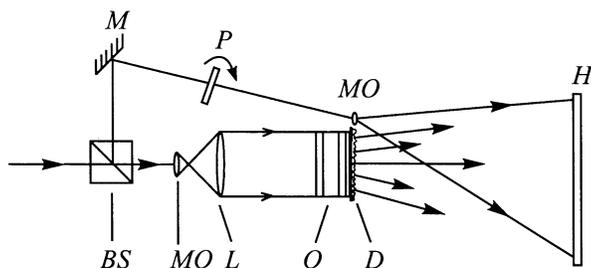
### Постановка эксперимента

В качестве примера нестационарного процесса нами был взят процесс развития квазисвободно-конвективной струи в замкнутой полости под действием изолированного источника тепла. Важным этапом в развитии теории струй жидкости является изучение течений при наличии эффекта плавучести, влияние которой на интенсивность теплообмена в ряде случаев может быть весьма существенным. Модели отдельных конвективных элементов, осуществляющих поток плавучести, можно, согласно [6], разделить на две обширные группы: движение имеет вид либо плавучих струй, либо термиков. В обоих случаях движение создается силой тяжести за счет различий в плотностях жидкости около источника тепла и в окружающем пространстве. Элементы теории плавучих струй описаны в работах [7,8].

Экспериментальное исследование подобного рода процессов теплопереноса оптическими методами проводилось рядом авторов [9–11], например, с помощью дифракционного интерферометра [10,11].

Изучение характера развития квазисвободно-конвективного течения в замкнутой полости выполнено нами для ряда простых жидкостей, отличающихся числом Прандтля  $Pr$  в диапазоне от 4.6 до 34. Основные физические характеристики используемых жидкостей взяты из [12,13].

Источником тепла служил промышленный резистор типа МЛТ (сопротивление  $R = 430 \Omega$ ) длиной 0.5 см и диаметром 0.18 см. Поток тепла варьировался величиной проходившего через резистор тока и изменялся от 0.02 до 1.7 W. Источник тепла помещался внутри металлической полости, две боковые грани



**Рис. 1.** Оптическая схема голографического интерферометра: *BS* — делитель пучка, *MO* — микрообъектив, *L* — линза, *M* — зеркало, *P* — плоскопараллельная пластинка, *O* — объект, *D* — диффузор, *H* — голограмма.

которой были выполнены из стекла для осуществления интерференционно-голографического контроля. Размер полости  $10 \times 30 \times 50$  mm, размер окна наблюдения  $30 \times 50$  mm.

Были проведены две серии экспериментов, различающихся положением резистора на дне полости. В первом случае резистор был расположен вдоль направления просвечивания, что позволяло сделать более однородным тепловое воздействие по толщине слоя жидкости в полости и считать источник тепла близким к линейному. Во второй серии экспериментов источник тепла помещался внутри сопла с диаметром выходного отверстия порядка 1 mm. В этом случае источник тепла можно считать близким к точечному.

Процесс развития свободно-конвективной струи изучался с помощью голографического интерферометра, особенностью схемы которого являлось расположение матового стекла непосредственно после исследуемого объекта (рис. 1) [14]. В этом случае матовый экран является областью локализации результирующей интерференционной картины, что упрощает процесс регистрации интерферограмм, но в то же время накладывает ограничение на характер изменения показателя преломления в изучаемом фазовом объекте.

Анализ изменения показателя преломления по картине интерференции будет строгим для плоских объектов и объектов, в которых показатель преломления зависит только от координат  $x, y$  и не зависит от  $z$ -направления просвечивания фазового объекта. В частности, использование источника тепла, близкого к линейному, позволяет проводить оценку изменения показателя преломления  $\Delta n = n(x, y) - n_0$  по упрощенной формуле

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{2\pi l}{\lambda} [n(x, y) - n_0], \quad (2)$$

или, переходя от набегу фазы  $\Delta\varphi(x, y)$  к числу полос  $k(x, y)$ , на которое переместилась интерференционная полоса после внесения возмущения в фазовый объект по сравнению с ее первоначальным положением для невозмущенного объекта (случай голографической интерферометрии в полосах конечной ширины [4,5]), по

формуле

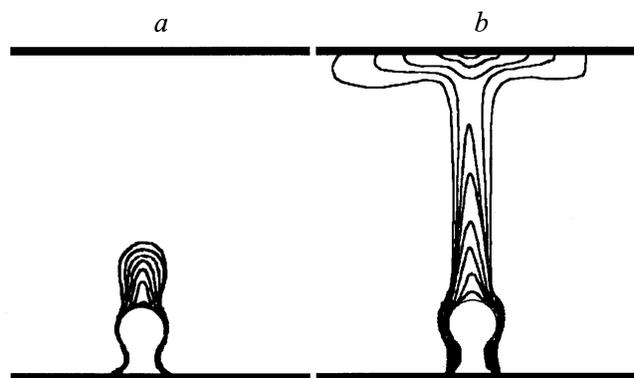
$$n(x, y) = \frac{k(x, y)\lambda}{l} + n_0. \quad (3)$$

При распространении конвективной струи от точечного источника тепла мы имеем дело с осесимметричным фазовым объектом, симметричным относительно направления распространения струи. В этом случае выражение (1) принимает вид интегрального уравнения Абеля, для решения которого мы воспользовались методом ступенчатой аппроксимации по Пирсу [15].

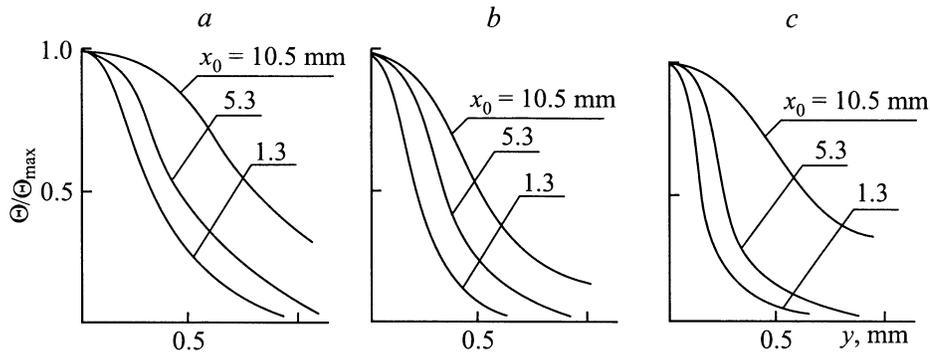
Информация о процессе развития свободно-конвективной струи, полученная методом голографической интерферометрии в полосах конечной ширины, дополнялась информацией, извлекаемой из интерферограмм в бесконечно широких полосах [4,5]. При этом интерферометрия в полосах конечной ширины давала возможность определять знак изменений показателя преломления, а интерферограммы в бесконечно широких полосах непосредственно дали линии равной температуры по исследуемому полю объекта.

Метод голографической интерферометрии реального времени дает возможность проследить весь процесс развития и установления конвективной струи. Регистрация интерферограмм осуществлялась с помощью кино съемочной аппаратуры, телекамеры и фотоаппарата. При использовании кино съемочной аппаратуры изменения в процессе регистрировались со скоростью от 3 до 16 кадров в секунду, что позволило с хорошей точностью определять временные характеристики течения, а именно время индуктивного прогрева и отрыва термика  $\tau_1$ , время удара конвективной струи о стенку и время установления квазистационарного режима конвекции  $\tau_2$ .

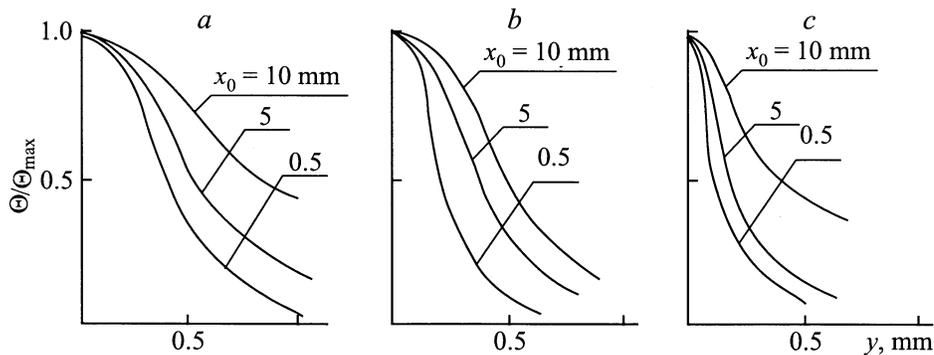
Температура контролировалась с помощью трех термопар, расположенных непосредственно над источником тепла, в стенке полости в месте удара струи и в области, не возмущенной тепловым потоком жидкости. Показания термопар позволили уточнить значения температуры, получаемые из интерферограмм на основе известной за-



**Рис. 2.** Поля температуры для двух моментов времени процесса развития свободно-конвективной струи в этиловом спирте: *a* — момент формирования и отрыва термика, *b* — момент установления свободно-конвективной струи.



**Рис. 3.** Приведенные профили температуры и свободно-конвективной струи для мощности источника тепла 0.23 W. Три сечения на различной высоте  $x_0$  от источника тепла.



**Рис. 4.** Приведенные профили температуры в свободно-конвективной струе в ацетоне для разных мощностей источника тепла. Три сечения при различных значениях  $x_0$ .

висимости показателя преломления используемых жидкостей от температуры на длине волны  $0.63 \mu\text{m}$ .

## Результаты эксперимента

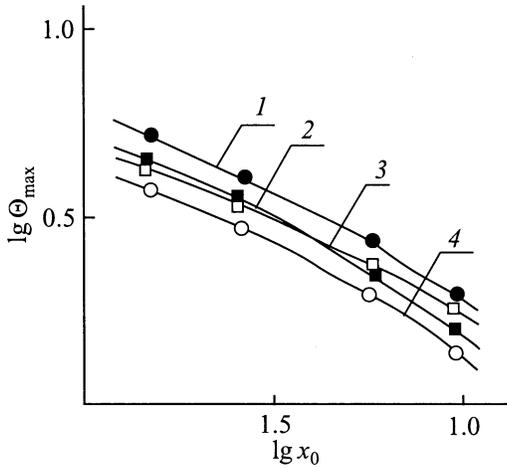
В начале рассмотрим более подробно результаты эксперимента по исследованию свободно-конвективной струи от линейного источника тепла. На основе интерферограмм в бесконечно широких полосах были получены поля температуры, устанавливающиеся в разные моменты времени развития свободно-конвективной струи в замкнутой полости, заполненной различными жидкостями. В качестве примера на рис. 2 представлены поля температуры в различные моменты времени развития свободно-конвективной струи в замкнутой полости, заполненной этиловым спиртом для мощности источника тепла 0.23 W. Рис. 2, *a* демонстрирует процесс формирования термика (3 s от начала процесса развития струи), а рис. 2, *b* показывает установление квазисвободно-конвективной струи после удара струи о верхнюю грань полости (10 s от начала нагрева). Значения температуры для соседних изотерм отличаются на величину  $\Delta\Theta$ , индивидуальную для каждой жидкости и зависящую от температурного коэффициента

изменения показателя преломления. В данном случае изменение температуры от изотермы к изотерме составляет  $0.395^\circ\text{C}$ .

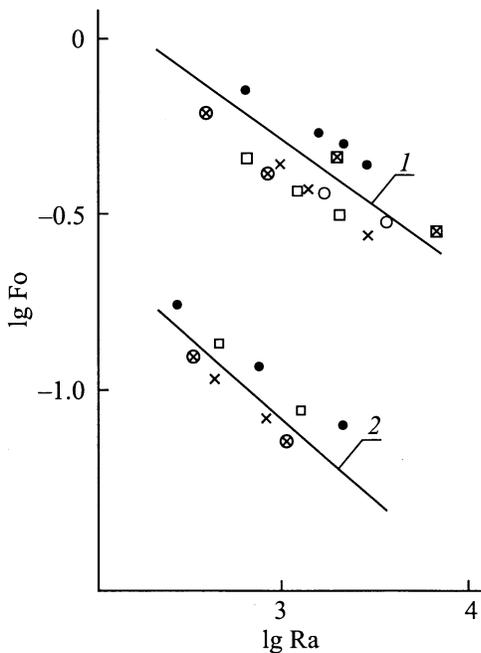
На основе анализа интерферограмм были получены приведенные профили температуры в развитой свободно-конвективной струе в исследуемых жидкостях для различных потоков тепла. На рис. 3 даны приведенные профили температуры в свободно-конвективной струе для мощности источника тепла 0.23 W в ацетоне (*a*), в этиловом спирте (*b*) и скипидаре (*c*).

На рис. 4 даны приведенные профили температуры в свободно-конвективной струе в ацетоне для разных мощностей источника тепла: 0.02 (*a*), 0.08 (*b*), 0.23 W (*c*).

На рис. 5 приведена полученная из интерферограмм зависимость затухания температуры  $\Theta_{\text{max}}$  вдоль оси симметрии свободно-конвективной струи от высоты над источником тепла  $x_0$ . В области свободно-конвективной струи, где влияние источника тепла, а также эффекта удара струи о стенку мало, затухание температуры в струе описывается следующим образом:  $\Theta_{\text{max}} \sim x_0^{-0.5}$ , где  $\Theta_{\text{max}}$  — максимальная избыточная температура на оси свободно-конвективной струи в некоторой точке  $x_0$  над источником тепла по сравнению с температурой не возмущенной тепловым потоком жидкости.



**Рис. 5.** Зависимость затухания температуры  $\Theta_{\max}$  вдоль оси симметрии свободно-конвективной струи от  $x_0$  в этиловом спирте (1), изопропиловом спирте (2), ацетоне (3), дистиллированной воде (4).



**Рис. 6.** Зависимости  $\lg Fo$  от  $\lg Ra$  для двух режимов развития свободно-конвективной струи: 1 — режим конвекции, 2 — режим теплопроводности.  $\otimes$  — вода,  $\times$  — изопропиловый спирт,  $\bullet$  — этиловый спирт,  $\circ$  — четыреххлористый углерод,  $\square$  — скипидар,  $\boxtimes$  — ацетон.

Теоретический интерес представляют зависимости критериев подобия — числа Фурье  $Fo$  от числа Рэлея  $Ra$ . Число Фурье  $Fo = \alpha \tau / l^2$  принимают за характеристику формирования температурного поля, где  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности,  $\tau$  — характерное время процесса,  $l$  — характерный линейный размер полости. Число выражает отношение интенсивностей двух физи-

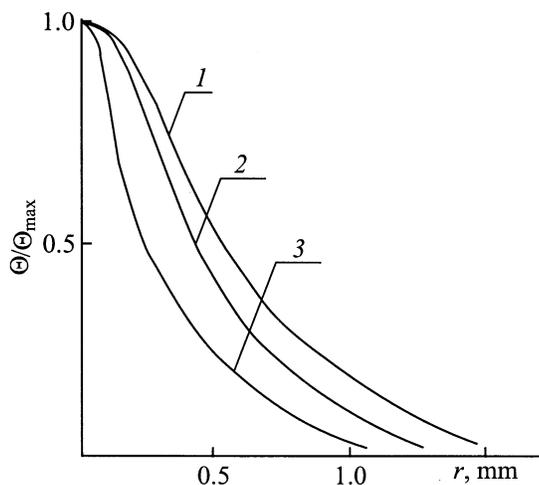
ческих эффектов — изменения температуры в веществе вдоль оси симметрии струи к изменению температуры в каждой точке на оси во времени. Число Рэлея  $Ra = gl^3 \beta_0 \Theta / \nu \alpha$  характеризует баланс между силами плавучести и ролью свободной конвекции в теплообмене, с одной стороны, и двумя диффузионными процессами, препятствующими движению и стабилизирующими его: процессами внутреннего трения под действием сил вязкости и процессом теплопроводности, с другой стороны [8]. Здесь  $g$  — ускорение свободного падения,  $l$  — характерный линейный размер полости,  $\beta_0$  — температурный коэффициент объемного расширения,  $\Theta$  — избыточная температура,  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости,  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности.

Экспериментально зависимость числа Фурье  $Fo$  от числа Рэлея  $Ra$  можно получить, определив в опыте характерные времена процесса развития конвективной струи и соответствующие этим временам избыточные температуры. Вид зависимости  $Fo = f(Ra)$  определялся для характерного времени индуктивного прогрева и соответствующей этому времени избыточной температуры в термике, а также для времени установившейся свободной конвекции и соответствующей ему избыточной температуры. Характерные времена определялись для различных жидкостей и различных потоков тепла с точностью  $1/10$  s. Избыточные температуры были получены из интерферограмм, эти результаты сопоставлялись с показаниями термомпар. В таблице приведены время индуктивного прогрева и отрыва термика  $\tau_1$  и

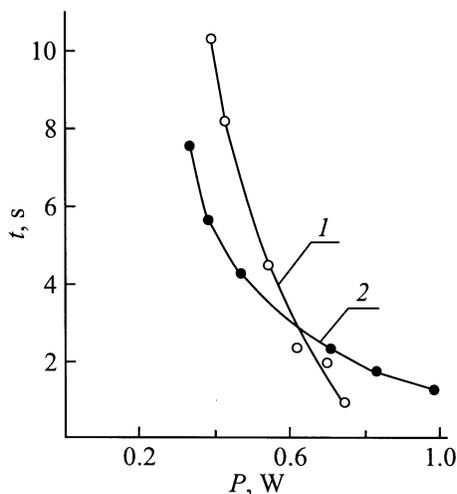
Значения времени формирования термика и времени установления режима конвекции и соответствующие избыточные температуры в струе для различных потоков тепла

Жидкость	0.02 W				0.08 W							
	$\tau_1, s$	$\Theta_1, ^\circ C$	$\tau_2, s$	$\Theta_2, ^\circ C$	$\tau_1, s$	$\Theta_1, ^\circ C$	$\tau_2, s$	$\Theta_2, ^\circ C$				
Вода (7.5)												
Этиловый спирт (16.8)	5	1.2	10	2.4	3	2.4	9	5.15				
Изопропиловый спирт (34)	6	1.1	10	2.7	4.2	4.2	8	5.0				
Ацетон (4.2)			12	2.2			6	4.6				
Четыреххлористый углерод (4.6)	3.3	1.3	10	2.1	2		8	5.0				
Скипидар (21.2)			9	3.15			7	6.0				
					0.23 W				0.48 W			
Вода (7.5)	3.5	6.5			2.8	8.05						
Этиловый спирт (16.8)	2.7		8	9.1	2		7	11.8				
Изопропиловый спирт (34)	3		8		2		6					
Ацетон (4.2)			5	6.6			3.5	6				
Четыреххлористый углерод (4.6)	1		6		1		4					
Скипидар (21.2)			5	6.5			4	10				

Примечание. В скобках указано число Прандтля.



**Рис. 7.** Радиальные распределения приведенных профилей температуры в этиловом спирте на высоте  $x_0 = 10$  mm над соплом. Поток тепла от точечного источника, W: 1 — 0.23, 2 — 0.52, 3 — 0.67.



**Рис. 8.** Зависимость времени отрыва термика от мощности источника тепла для изопропилового спирта (1) и этилового спирта (2).

соответствующая температура  $\Theta_1$  в термике, а также время установления квазистационарного режима конвекции  $\tau_2$  и соответствующая максимальная избыточная температура  $\Theta_2$  в струе для различных жидкостей, отличающихся числом Прандтля.

График зависимости  $\lg Fo$  от  $\lg Ra$  дан на рис. 6. Вид зависимости числа Фурье  $Fo$  от числа Рэлея  $Ra$  получен применением метода наименьших квадратов к величинам  $\lg Fo$  от  $\lg Ra$ . Наклон прямой 1 позволяет утверждать, что в эксперименте получена зависимость  $Fo \sim Ra^{-0.21}$ , что соответствует теоретическим положениям для свободно-конвективной струи в замкнутой полости [8].

Для случая свободно-конвективной струи от точечного источника тепла полученные методом ступенчатой аппроксимации по Пирсу величины  $\Delta n_i$  дали возможность построить радиальные распределения показателя преломления в конвективной струе для ряда жидкостей. Расчеты проводились для нескольких сечений над соплом. На рис. 7 приведены радиальные распределения профилей температуры в этиловом спирте на высоте  $x_0 = 10$  mm над соплом для различных мощностей источника тепла.

На рис. 8 дана зависимость времени  $t$  отрыва термика от мощности  $P$  источника тепла для изопропилового спирта (кривая 1) и этилового спирта (кривая 2).

## Выводы

Приведенные результаты исследования процесса развития свободно-конвективной струи в замкнутой полости свидетельствуют об эффективности метода голографической интерферометрии в задачах исследования теплопереноса в прозрачных средах. Получены приведенные профили температур и параметры развития свободно-конвективной струи, соответствующие теории. Разработанная методика интерференционно-голографического исследования и полученный обширный экспериментальный материал по интерференционно-голографическому исследованию свободной конвекции может представлять интерес для специалистов в области свободной конвекции.

Авторы выражают благодарность П.В. Гранскому за помощь в обработке экспериментального материала на ЭВМ.

Работа выполнена при поддержке Научной школы (грант РФФИ № 00-15-96771).

## Список литературы

- [1] Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. М.: Машиностроение, 1982. 239 с.
- [2] Васильев Л.А. Теневые методы. М.: Наука, 1968. 400 с.
- [3] Хауф В., Григуль У. Оптические методы в теплопередаче. М.: Мир, 1973. 240 с.
- [4] Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 339 с.
- [5] Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.
- [6] Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977. 431 с.
- [7] Зельдович Я.Б. // ЖЭТФ. 1973. Т. 7. Вып. 12. С. 1463–1465.
- [8] Мартыненко О.Г., Соколовишин Ю.А. Свободно-конвективный теплообмен. Справочник. Минск, 1982. С. 162–164.
- [9] Мустафин К.С., Селезнев В.А., Штырков Е.И. // Опт. и спектр. 1967. Т. 22. С. 319–321.
- [10] Ляхов Ю.И. // ПМТФ. 1970. № 2. С. 169–173.
- [11] Зимин В.Л., Ляхов Ю.И. // ПМТФ. 1970. № 3. С. 159–161.

- [12] *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
- [13] Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. У.К. Кикоина. М.: Атомиздат. 1976. 1004 с.
- [14] *Баранников А.Л., Ганжерлин Н.М., Гуревич С.Б.* и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1985. Т. 49. Вып. 4. С. 711–714.
- [15] *Пирс У.Д.* // Получение и исследование высокотемпературной плазмы. М.: ИЛ, 1962. 221 с.