

УДК 53.05  
PACS 92.60.jk

## Исследование термоконцентрационной конвекции во влажном воздухе методом голографической интерферометрии

С. А. Сомов<sup>1,2</sup>, А. С. Иванов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН  
614013, Пермь, ул. Академика Королева, 1

<sup>2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет  
614990, Пермь, ул. Букирева, 15  
email: csomov@mail.ru

Представлены результаты исследования конвекции влажного воздуха в условиях, приближенных к атмосферным. Приводятся и анализируются численные оценки безразмерных газодинамических параметров, характерных для задачи о конвекции сухого и влажного воздуха. Описаны отличительные особенности конвекции, вызванные изменением концентрации водяного пара в результате его испарения (конденсации). Влияние концентрации водяного пара на конвективную устойчивость влажного воздуха рассматривается с позиции концентрационной конвекции, характеризуемой концентрационным числом Рэлея. Приведены технические характеристики экспериментальной установки, использующей принцип голографической интерферометрии для исследования термоконцентрационной конвекции влажного воздуха в интервале температур от 5 до 45 °С. Демонстрируется возможность различать конвективный теплоперенос во влажном воздухе в лабораторных условиях.

**Ключевые слова:** конвекция; число Рэлея; голографическая интерферометрия; влажный воздух

*Поступила в редакцию 03.02.2020; принята к опубликованию 17.02.2020*

## Study of thermosolutal convection in moist air by holographic interferometry method

S. A. Somov<sup>1,2</sup>, A. S. Ivanov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Ac. Korolev st. 1, 614013, Perm, Russia

<sup>2</sup> Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm, Russia  
email: csomov@mail.ru

The results of a study of convection of moist air in conditions close to atmospheric are presented. Numerical estimates of dimensionless gas-dynamic parameters characteristic of the problem of convection of dry and moist air are presented and analyzed. Distinctive features of convection caused by a change in the concentration of water vapor as a result of its evaporation (condensation) are described. The effect of water vapor concentration on the convective stability of moist air is considered from the point of view of concentration convection, characterized by the concentration Rayleigh number. The technical characteristics of an experimental setup using the principle of holographic interferometry to study the thermoconcentration convection of moist air in the temperature range from 5 to 45 C are shown. The ability to distinguish convective heat and mass transfer in humid air under laboratory conditions is demonstrated.

**Keywords:** convection; Rayleigh number; holographic interferometry; moist air

Received 03.02.2020; accepted 17.02.2020

doi: 10.17072/1994-3598-2020-2-48-56

## 1. Введение

Конвекция в газе (воздухе) – это внутреннее движение, вызванное нарушением механического равновесия в системе и направленное на восстановление равновесного состояния. В атмосфере Земли наблюдаются процессы сложного конвективного теплопереноса, требующие физического и математического описания с помощью газодинамических моделей с их обязательной экспериментальной верификацией. Исследование конвекции в атмосфере имеет большое значение для разработки и совершенствования методик прогноза погоды и климата. Конвекция динамически влияет на крупномасштабные атмосферные явления [1, 2]. Этой проблеме посвящено большое число работ [3–7], где обсуждается взаимосвязь различных типов атмосферной циркуляции с изменением погоды.

Важную роль в конвекции влажного воздуха атмосферы играет фазовый переход первого рода в системе «вода – водяной пар» [8], однако в большинстве случаев это явление рассматривается лишь с термодинамической точки зрения: вычисляется скрытая теплота фазового перехода в результате конденсации или испарения и учитывается влияние соответствующего выделяющегося или поглощающегося тепла на поведение системы. Такой подход имеет своё обоснование, так как безразмерные числа Рэлея (тепловое)  $Ra_T$  для влажного и сухого воздуха в характерном для атмосферы диапазоне температур (от 0 до 50 С) оказываются близки. Этим удачным для прикладных задач обстоятельством пользуются все исследователи, проводя эксперименты и вычисления с использованием параметров для сухого воздуха, не принимая во внимание его влажность. Данный подход основывается на том, что объемная доля водяного пара во влажном воздухе в указанном диапазоне температур не превышает 15 %. Это справедливо только в отсутствие фазового перехода «вода – водяной пар», приводящего к локальным изменениям давления и удельного объема. По этой причине исследование теплопереноса во влажном воздухе с позиции тепловой конвекции следует признать недостаточным. Предполагается, что задачу о конвекции во влажном воздухе необходимо дополнительно изучить с позиции концентрационной конвекции, так как нагрев или охлаждение влажного воздуха не только приводит к его тепловому расширению, но и изменяет концентрационный состав газовой смеси «сухой воздух – водяной пар»

за счет испарения и конденсации пара соответственно.

Следует отметить, что лабораторное моделирование термоконцентрационной конвекции в условиях атмосферы Земли невозможно, так как атмосфера является существенно стратифицированной по плотности, с характерным размером десять километров и характерной скоростью движения воздушных масс десятки метров в секунду. Изготовить лабораторный макет для наблюдения процесса, одновременно удовлетворяющего всем критериям подобия реальной атмосферы Земли, невозможно. В этой связи предпринятое исследование посвящено изучению лишь одного аспекта – влиянию фазового перехода «вода–пар» на интенсивность конвекции во влажном воздухе.

Целью настоящей работы является проектирование эксперимента для исследования конвекции влажного воздуха в условиях, приближенных к атмосферным на основе анализа и численных оценок безразмерных газодинамических параметров, характеризующих конвекцию в сухом и влажном воздухе. Обсуждаются отличительные особенности конвекции сухого и влажного воздуха, вызванные изменением концентрации водяного пара в результате его испарения/конденсации.

## 2. Определяющие параметры

Планирование эксперимента на основе оценочных вычислений является самой ответственной частью работы. Для корректного проведения эксперимента требуется выбрать критерии подобия (безразмерные величины), позволяющие изготовить лабораторный макет изучаемой физической системы, который максимально точно описывает основные черты и процессы, происходящие в атмосфере. На практике качественные оценки по порядку величины часто являются ошибочными и приводят к неверной интерпретации результатов, что может существенно повлиять на конечный вариант построения модели. Поэтому была произведена более точная числовая оценка свободной конвекции [9–11], характеризуемой безразмерным числом Рэлея. Так как в исследуемой задаче одновременно происходят нагрев и изменение концентрации в смеси двух газов: сухого воздуха и водяного пара, то необходимо использовать два независимых числа Рэлея, учитывающих оба эти механизма: тепловое  $Ra_T$  и концентрационное  $Ra_C$  числа Рэлея. Их сумма соответствует эффективному числу Рэлея  $Ra_E$ :

$$Ra_T = \frac{gC_p\rho^2 d^3 \Delta T}{\kappa\eta T_0}, \quad Ra_C = \frac{gd^3 \Delta\rho_c}{\eta D}, \quad (1)$$

$$Ra_E = Ra_T + Ra_C,$$

где  $d$  – характерный размер полости с влажным воздухом,  $\Delta T$  – перепад температур,  $T_0$  – среднее по объему полости значение температуры,  $\kappa$  – теплопроводность,  $C_p$  – удельная теплоемкость газовой смеси,  $\eta$  – динамическая вязкость,  $D$  – кинематический коэффициент диффузии для газовой смеси,  $\rho$  – средняя плотность газа,  $\Delta\rho_c$  – изменение плотности, вызванное изменением концентрационного состава смеси. В неизоэнтальной системе локальные значения теплофизических параметров могут изменяться в значительных пределах, поэтому функциональная связь между безразмерными величинами зависит от того, какую температуру и концентрацию выбрать в качестве определяющей. Температурная зависимость параметров жидкости или газа сказывается на экспериментальных результатах в наименьшей степени, если в качестве определяющей выбрать среднее по объему среды значение температуры. То же самое относится и к концентрационной зависимости. Поэтому в формулах для  $Ra_T$  и  $Ra_D$  используются именно средние значения температуры и концентрации.

Для нахождения корректных значений  $Ra_T$ ,  $Ra_C$  необходимо использовать точные значения теплофизических параметров газа из справочной литературы [12]. Зависимость теплофизических свойств газов от температуры и давления достаточно хорошо изучены. Для водяного пара известны экспериментальные скелетные таблицы, но на практике все пользуются не табличными значениями, а известными точными интерполяционными формулами. В дальнейшем также будут использоваться полумпирические уравнения, учитывающие зависимость параметров  $C_p$ ,  $\kappa$ ,  $\eta$ ,  $D$ ,  $\rho$  от давления, температуры и концентрационного состава смеси газов «сухой воздух – водяной пар».

Для чистых газов и газовых смесей в интервале температур от 270 до 400 К и при давлениях от  $10^2$  до  $10^6$  Па выполняется уравнение Менделеева-Клапейрона и другие уравнения для идеального газа. При этом погрешность вычисления параметров состояния воздуха и водяного пара (вдали от фазового перехода) в рамках классической теории идеального газа находится в пределах 1–2%. Исходя из этого для плотности влажного воздуха  $\rho$ , используется формула, учитывающая изменение парциальных давлений  $P_1$  водяного пара и  $P_2$  сухого воздуха с температурой:

$$\rho = \frac{P_1 M_1 + P_2 M_2}{k_b T N_a}, \quad P_1 + P_2 = P_0, \quad (2)$$

где  $M_1 = 0.018$  кг/моль и  $M_2 = 0.029$  кг/моль – молярная масса водяного пара и сухого воздуха соот-

ветственно,  $k_b = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T$  – температура газовой смеси (в градусах К),  $N_a = 6.02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – число Авогадро. Парциальные давления  $P_1$  и  $P_2$  в сумме равны атмосферному давлению  $P_0$ , измеряемому экспериментально.

Парциальное давление насыщенного водяного пара  $P_1$  является хорошо изученной функцией температуры [12, 13]:

$$\lg \frac{P_1}{P_0} = -2.2195983 + 10.79586 \left( 1 - \frac{273.16}{T} \right) -$$

$$- 5.02808 \lg \frac{T}{273.16} +$$

$$+ 1.50474 \cdot 10^{-4} \left( 1 - 10^{-8.29692 \left( \frac{T}{273.16} - 1 \right)} \right) +$$

$$+ 0.42873 \cdot 10^{-3} \left( 10^{4.76955 \left( 1 - \frac{273.16}{T} \right)} - 1 \right), \quad (3)$$

где значение  $[P_1]$  имеет размерность мБар ( $10^2$  Па). Таким образом, зная температуру влажного воздуха  $T$  при атмосферном давлении  $P_0$ , можно по формуле (3) вычислить соответствующее парциальное давление водяного пара, а по формуле (2) найти парциальное давление сухого воздуха и вычислить искомую плотность.

Кинематический коэффициент диффузии  $D_{1,2}$  бинарной смеси рассчитывался по формуле Гиршфельдера [14]:

$$D_{1,2} = \frac{BT^{3/2}}{P_0 \sigma_{1,2} \Omega_{1,2}^{(1,1)}} \left( \frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

$$B = 0.00214 - 0.000492 \left( \frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

$$\Omega_{1,2}^{(1,1)} = 1.075 \left( \frac{k_b T}{\varepsilon_{1,2}} \right)^{-0.01615} + 2 \left( \frac{10 k_b T}{\varepsilon_{1,2}} \right)^{-0.74 \lg \frac{10 k_b T}{\varepsilon_{1,2}}}, \quad (6)$$

где  $B$  – уточненный коэффициент Уилки [15],  $[D_{1,2}]$  имеет размерность см<sup>2</sup>/с, давление смеси  $[P]$  измеряется в единицах атм (101325 Па),  $\varepsilon_{1,2}$  и  $\sigma_{1,2}$  – постоянные сил в потенциале Леннарда-Джонса, описывающие молекулярные взаимодействия в газе. Постоянные взаимодействия  $\varepsilon_{1,2}$  и  $\sigma_{1,2}$  были вычислены по методике [16] с использованием табличных значений для компонент влажного воздуха:  $\varepsilon_1/k_b = 380$  К,  $\sigma_1 = 0.265$  нм и  $\varepsilon_2/k_b = 97.0$  К,  $\sigma_2 = 0.3617$  нм для молекул воды и сухого воздуха соответственно. Расчет постоянных сил  $\varepsilon_{1,2}$  и  $\sigma_{1,2}$  производился по формулам для смеси полярного (водяной пар) и неполярного (сухой воздух) газов:

$$\sigma_{1,2} = 0.5(\sigma_1 + \sigma_2) \xi^{-1/6} = 0.3103 \text{ нм},$$

$$\frac{\varepsilon_{1,2}}{k_b} = \frac{(\varepsilon_1 \varepsilon_2)^{0.5} \xi^2}{k_b} = 215.8 \text{ К}, \quad (7)$$

$$\xi = 1 + 2^{-0.5} \alpha_2^* \alpha_1^* \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)^{0.5} = 1.0603,$$

где безразмерный параметр Стокмайера для молекулы воды  $t_1^* = 1.2$ , а безразмерная поляризуемость молекулы воздуха  $\alpha_2^* = \alpha_2 / \sigma_2^3 = 0.03592$ . Параметр  $t_1^*$  характеризует отличие в поведении полярных и неполярных веществ. Вычисленная по (4) зависимость  $D_{1,2}(p, T)$  описывается с погрешностью менее 0.5 %:

$$D_{1,2} = \frac{0.2177 + 1.5562 \cdot 10^{-3}T + 2.2813 \cdot 10^{-6}T^2}{p}$$

Для проведения оценочных расчетов можно считать, что коэффициент  $D_{1,2}$  не зависит от относительной концентрации компонент, так как соотношение «водяной пар / сухой воздух» при любой реализуемой в эксперименте температуре не превышает 1/8. Справедливость этого утверждения можно продемонстрировать путем сопоставления с известными данными для других газовых смесей. Так, по экспериментальным данным [16] для смеси  $H_2$  с  $CO_2$  изменение мольного отношения от 3/1 до 1/1 приводит к увеличению  $D_{1,2}$  всего лишь на 1.8%. Очевидно, что в нашем случае зависимость  $D_{1,2}$  от процентного соотношения компонент смеси будет ещё на порядок меньше.

Для расчета динамической вязкости, теплоемкости и теплопроводности были установлены полуэмпирические формулы путем аппроксимации данных из скелетных таблиц ГСССД 125-88 [17] для влажного воздуха. Расчет указанных теплофизических параметров в диапазоне температур 270–400 К и давлений  $10^2$ – $10^6$  Па не зависит от давления (погрешность вычислений при этом не превышает 1 %):

$$\eta = -2.45614 \cdot 10^{-15}t^5 + 2.56583 \cdot 10^{-13}t^4 - 1.32329 \cdot 10^3t^3 + 2.17221 \cdot 10^{-10}t^2 + 4.59113 \cdot 10^{-8}t + 1.72539 \cdot 10^{-5}, \quad (8)$$

$$C_p = 1785.60629 - 372.25007t + 0.36963t^4 - 0.012978t^5 + 0.00029t^6 - 4.22899 \cdot 10^{-6}t^7, \quad (9)$$

$$\kappa = -3.77888 \cdot 10^{-12}t^5 + 5.97899 \cdot 10^{-10}t^4 - 3.80594 \cdot 10^{-8}t^3 + 1.06486 \cdot 10^{-6}t^2 + 5.88323 \cdot 10^{-5}t + 0.02435, \quad (10)$$

размерность температуры  $[t]$  – градусы Цельсия (С), вязкости  $[\eta]$  – Па·с, теплоемкости  $[C_p]$  – Дж/(кг·К), теплопроводности  $[\kappa]$  – Вт/(м·К).

Известные теплофизические параметры влажного воздуха (2)–(10) позволяют рассчитать конвективный коэффициент  $k_c$  числа Рэлея (1):

$$Ra_E = k_c d^3 \Delta T. \quad (11)$$

Как известно, появлению конвекции соответствует критическое значение числа Рэлея

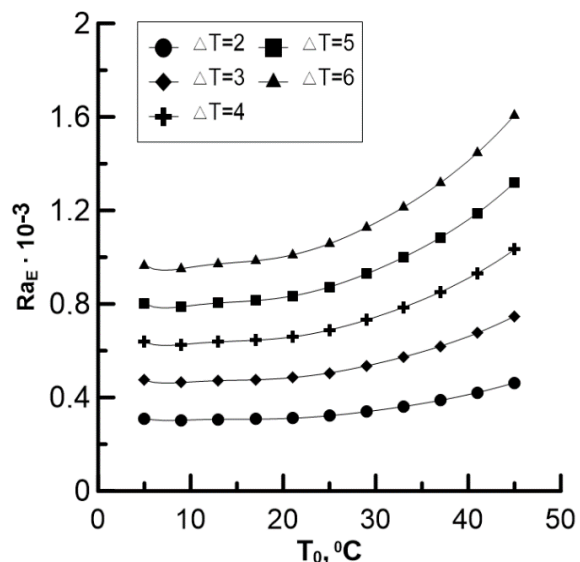
$Ra^* = 1700 \pm 50$  [18], которое следует подставить в (11) с целью отыскания основных параметров экспериментальной установки – характерного размера экспериментальной ячейки  $d$  и разности температур  $\Delta T$  между холодильником и нагревателем. Порядок величин, входящих в (11) при  $Ra_E = Ra^*$ , составляет  $d \sim 10^{-2}$  м,  $\Delta T \sim 1$  К. Очевидно, что характерный масштаб величин  $d$  и  $\Delta T$  затрудняет экспериментальное изучение конвекции во влажном воздухе и вынуждает искать компромиссное решение.

Вследствие кубической зависимости  $Ra_E \sim d^3$ , даже незначительное (но желательное) увеличение размеров экспериментальной ячейки  $d$  приводит к резкому росту  $Ra_E$ , а гипотетическое уменьшение перепада температур  $\Delta T$  ограничено возможностями экспериментальной аппаратуры по контролю и поддержанию постоянной температуры холодильного и нагревательного резервуара с приемлемой точностью ( $\sim 0.1$  К).

Для определения оптимальных компромиссных значений  $d$  и  $\Delta T$  были построены таблица (см. табл. 1) и график (рис. 1).

**Таблица 1.** Необходимый размер ячейки для начала конвекции

$T_0, ^\circ\text{C}$	$d, \text{мм}$				
	$\Delta T=2^\circ\text{C}$	$\Delta T=3^\circ\text{C}$	$\Delta T=4^\circ\text{C}$	$\Delta T=5^\circ\text{C}$	$\Delta T=6^\circ\text{C}$
15	17.7	15.3	13.8	12.8	12.0
20	17.6	15.2	13.7	12.7	11.9
25	17.4	15.0	13.5	12.5	11.7
30	17.0	14.6	13.2	12.2	11.4



**Рис. 1.** График зависимости эффективного числа Рэлея от температуры при высоте полости  $d=1$  см. Средняя температура  $T_0$  изменяется в диапазоне от 5 до 45 С, т.к. именно в таком диапазоне температур легче всего поддерживать стабильный перепад температур  $\Delta T$

### 3. Экспериментальная установка

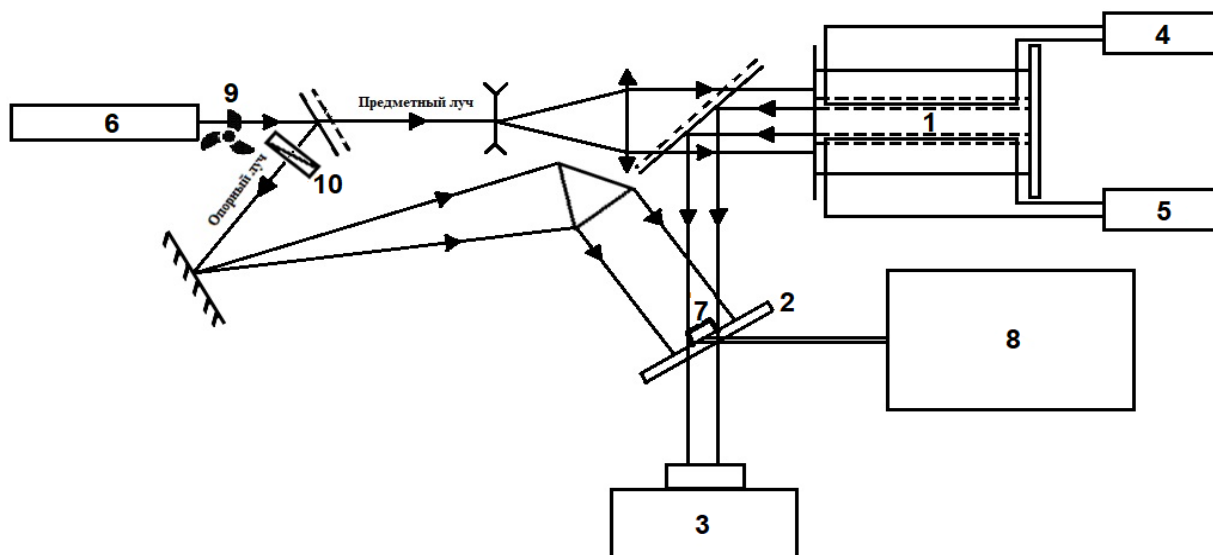
Выберем подходящий метод экспериментального наблюдения и изучения свободной конвекции во влажном воздухе. Как известно, стандартными методами, получившими наибольшее распространение для исследования явлений тепломассопереноса в прозрачных средах, являются: теневой метод, интерферометрический метод с использованием схемы Фабри–Перро, голографическая интерферометрия [19, 20]. Применение классических теневых и интерференционных методов осложняется недостаточной чувствительностью при малых перепадах  $\Delta T$  (что желательно в нашем эксперименте), низкая чувствительность по причине малой длины когерентности лазерного излучения (для наиболее распространенного He-Ne лазера длина когерентности составляет приблизительно 20 см). По этим причинам был выбран метод голографической интерферометрии. Данный метод позволяет визуализировать распределение тепловых и концентрационных полей в сложных по форме объектах в режиме реального времени. Значительным преимуществом голографического интерферометра является нетребовательность к большой длине когерентности излучения лазера и к качеству оптических компонентов (линз и зеркал).

Для исследования конвекции во влажном воздухе была предложена и разработана экспериментальная установка, изображенная на рис. 2. Источником когерентного поляризованного излучения является He-Ne лазер Uniphase с длиной волны 632.8 нм. Луч лазера с помощью полупрозрачного зеркала делится на два: опорный и

предметный. Опорный луч, отражаясь несколько раз от системы зеркал, падает на голографическую фотопластинку, где интерферирует с предметным лучом, который дважды проходит через измерительную ячейку с влажным воздухом. Получаемая на голографической пластинке интерферометрическая картина записывается видеокамерой для дальнейшей обработки изображений и интерпретации экспериментальных наблюдений.

Получение полезной информации о конвекции во влажном воздухе возможно только в том случае, если установка обладает достаточной чувствительностью. В конечном счете чувствительность и разрешающая способность установки (рис. 2) зависит от того, способна ли исследуемая среда (неоднородно нагретый влажный воздух), помещенная в измерительную ячейку, значительно изменить оптическую разность хода предметного луча, интерферирующего с опорным лучом. Чем больше разность хода луча, тем больше интерференционных полос можно будет наблюдать, тем выше разрешающая способность установки, и тем подробнее картина исследуемого газодинамического течения. Удовлетворительное количество интерференционных полос, которое позволяет судить о процессах, происходящих в исследуемом объекте, должно быть не менее пяти (т.е. десять чередований темная/светлая полоса).

Выполним численные оценки, позволяющие определить, какой должна быть измерительная ячейка, чтобы при известном  $\Delta T$  обеспечить требуемую разрешающую способность установки. Для этого учтем зависимость показателя преломления света от двух параметров: температуры и



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки: 1 – измерительная ячейка, заполненная влажным воздухом; 2 – голографическая пластинка; 3 – видеокамера; 4 – теплообменник и термостат холодильника; 5 – теплообменник и термостат нагревателя; 6 – He-Ne лазер; 7 – датчик; 8 – селективный нановольтметр Unipan type 237; 9 – обтюратор; 10 – поляризатор

концентрации водяных паров:

$$n(T, C) = n_0 + \frac{dn}{dT}(T - T_0) + \frac{dn}{dC}(C - C_0), \quad (12)$$

где  $n_0$  – показатель преломления при  $T = T_0$  и  $C = C_0$  – концентрации водяных паров при  $T_0 = 20$  °С. Связь показателя преломления смеси газов с плотностью, а, следовательно, и с концентрацией определяется уравнением Лоренц–Лорентца [20]:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \sum_i R_i \rho_i, \quad (13)$$

где  $R_i$  – удельная рефракция,  $\rho_i$  – удельная плотность. Для влажного воздуха данное уравнение (13) имеет вид:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = R_1 \rho_1 + R_2 \rho_2, \quad (14)$$

в котором  $R_1$  и  $R_2$  – удельная рефракция сухого воздуха и водяного пара,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – соответственно удельные плотности этих газов.

Для нахождения постоянных показателя преломления  $R_1$  и  $R_2$  преобразуем выражение (13):

$$R_i = \frac{n^2 - 1}{\rho_i (n^2 + 2)}. \quad (15)$$

Первую компоненту можно вычислить по формуле:

$$10^8 \cdot (n - 1) = 8340.78 + \frac{2405640}{130 - 1/\lambda_{vac}^2} + \frac{15994}{38.9 - 1/\lambda_{vac}^2}, \quad (16)$$

$$\rho = 348.328 \frac{P}{T} \left[ 1 + P(57.90 \cdot 10^{-8} - \frac{0.94581 \cdot 10^{-8}}{T} + \frac{0.25844}{T^2}) \right] \quad (17)$$

при температуре газа 15 °С, давлении 1013.25 мБар и  $\lambda_{vac} = 632.8$  нм. Удельная рефракция сухого воздуха составляет  $1.48 \cdot 10^{-7}$ . Вторую компоненту вычислим по [12, 13]:

$$10^8 \cdot (n - 1) = 295.235 + \frac{2.6422}{\lambda_{vac}^2} - \frac{0.032380}{\lambda_{vac}^4} + \frac{0.004028}{\lambda_{vac}^6}, \quad (18)$$

$$\rho = 216.582 \frac{P}{T} \left[ 1 + P^2(1 + 3.7 \cdot 10^{-4}) \times \left( -2.37321 \cdot 10^{-3} + \frac{2.23366}{T} - \frac{710.792}{T^2} + \frac{7.75141 \cdot 10^4}{T^3} \right) \right] \quad (18)$$

при температуре 20 С, давлении 13.33 мБар и  $\lambda_{vac} = 468$  нм. Удельная рефракция водяного пара составляет  $1.99 \cdot 10^{-7}$ . Показатель преломления для произвольной температуры и концентрации молекул в газовой смеси уточняется согласно уравнению Менделеева-Клапейрона и (2). В табл. 2 приведены значения  $dn/dT$  и  $dn/dC$  в интервале температур от 15 до 30 °С.

**Таблица 2.** Температурный и концентрационный вклад в показатель преломления в зависимости от температуры

$t, \text{°C}$	$dn/dT, \times 10^7$	$dn/dC, \times 10^7$
15	9.4	5.8
20	9.1	5.7
25	8.8	5.6
30	8.5	5.5

Как видно из табл. 2, производные показателя преломления по концентрации и температуре одинаковы по порядку величины. Значит, в уравнении (12) надо учитывать оба этих слагаемых при расчете результирующего значения  $n(T)$ , так как вклад обоих слагаемых в конечную чувствительность интерферометра одинаков. Поэтому рассчитаем длину ячейки  $L$  необходимую для получения, как уже было упомянуто ранее, 5 интерференционных полос исходя из связи оптической разности хода  $L, \Delta n$  с числом длин волн  $N$  по формуле

$$L = \frac{N\lambda}{2\Delta n} \approx 0.32 \text{ м}, \quad (20)$$

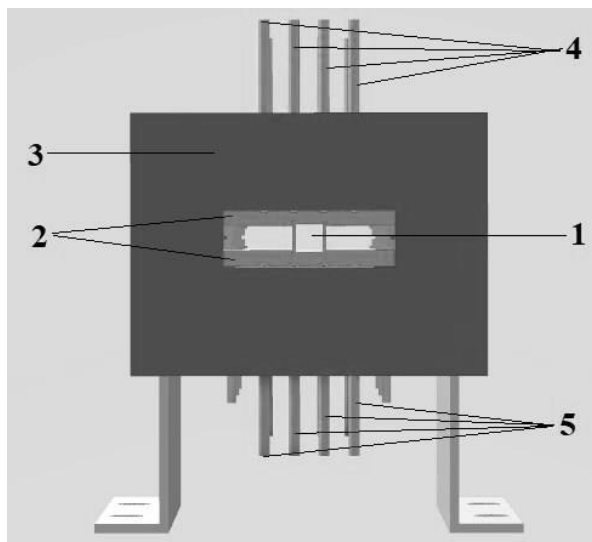
где  $\Delta n$  – изменение показателя преломления влажного воздуха, вызванное перепадом температуры  $\Delta T$  между холодильником и нагревателем,  $\lambda$  – длина волны гелий-неонового лазера 632.8 нм,  $N = 5$  – требуемое число интерференционных полос. Коэффициент 2 в знаменателе (20) объясняется тем, что луч лазера дважды проходит ячейку. Здесь вновь приходится принять компромиссное решение, связанное с увеличением  $\Delta T$  (с целью увеличить число интерференционных полос  $N$  и уменьшить длину установки  $L$ ) и уменьшением высоты ячейки  $d$  (11). Для помощи в определении оптимальных значений  $L, \Delta T$  и  $d$  была построена таблица (см. табл. 3).

**Таблица 3.** Необходимая длина ячейки  $L$  для получения  $N = 5$  интерференционных полос

$T, \text{°C}$	$L, \text{см}$				
	$\Delta T=2\text{°C}$	$\Delta T=3\text{°C}$	$\Delta T=4\text{°C}$	$\Delta T=5\text{°C}$	$\Delta T=6\text{°C}$
15	53.1	31.8	22.7	17.7	14.5
20	54.1	32.4	23.2	18.0	14.7
25	54.8	32.9	23.5	12.5	14.9
30	55.3	33.2	23.7	18.4	15.1

Объединяя результаты табл. 1 и 3, можно прийти к следующему выводу: оптимальными для экспериментального изучения конвекции во влажном

воздухе являются такие параметры установки: поддерживаемая разность температур  $\Delta T = 3$  К, высота полости  $d = 15$  мм, длина полости  $L = 32$  см. По данным параметрам была разработана компьютерная модель экспериментальной установки (рис. 3) в программе для трехмерного проектирования «Компас-3D».



**Рис. 3.** Модель установки для исследования конвекции во влажном и сухом воздухе: 1 – конвективная ячейка; 2 – теплообменники; 3 – корпус установки; 4 – тепловые трубки холодильника; 5 – тепловые трубки нагревателя

#### 4. Юстировка экспериментальной установки

По модели, изображенной на рис. 3, изготовлен лабораторный макет и собрана схема, изображенная на рис. 2.

Во время юстировки установки необходимо было выполнить следующие экспериментальные требования:

- 1) свести вибрацию всей установки к минимуму;
- 2) обеспечить минимальную разность интенсивностей между предметным и опорным пучком;
- 3) минимизировать угол между сходящимися опорным и предметным лучами на голографическую пластину.

Все элементы установки (рис. 2) были смонтированы на голографической плите, демпфированной 4 воздушными подушками, что минимизировало вредные механические вибрации, воздействующие извне на установку во время снятия голограммы.

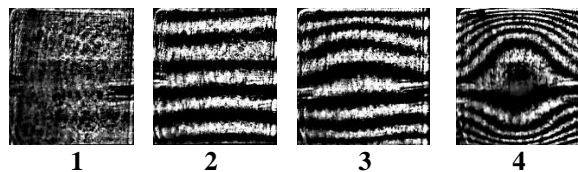
Перед снятием голограммы интенсивность опорного и предметного лучей выравнивалась с целью увеличения контрастности интерференционных полос. Выравнивание интенсивности дости-

галось путем ослабления опорного луча одним поляризатором. Применение дополнительного анализатора не требовалось, так как свет лазера уже являлся поляризованным со степенью поляризации 500:1. Юстировка осуществлялась с помощью стандартной методики: исходный луч лазера модулировался механическим лопастным обтюратором с частотой  $f_t = 75$  Гц с целью получения переменного импульсного сигнала. Далее опорный и предметный лучи по отдельности (один из лучей перекрывался) направлялись на фотодиод, расположенный в том же месте, где позже будет располагаться голографическая пластинка. Модулированный пучок света вызывает переменный ток частоты  $f_t$  в последовательной цепи фотодиода, резистора и батареи питания, обеспечивающей обратное смещение фотодиода. С помощью селективного нановольтметра Uniiran на частоте  $f_t$  измерялось напряжение, возникающее на резисторе при протекании через него пульсирующего фотодиодного тока. Применение подобной схемы позволяет исключить влияние паразитной засветки фотодиода дневным освещением, а также надежно измерить слабый зашумленный полезный сигнал.

С помощью системы линз было выполнено условие минимального угла между основным и предметным лучами. Это условие очень важно, так как оно значительно влияет на контрастность получаемой интерферометрической картины, если разрешающая способность голографической пластинки не превышает 1–1.5 тысяч линий на 1 мм, что является типичной характеристикой использованных пластинок ПФГ-01.

#### 5. Результаты

Для проверки представленных вычислений и наглядной демонстрации были проведены тестовые наблюдения конвекции в воздухе без его предварительного осушения или увлажнения. Полученные интерференционные картины приведены на рис. 4.



**Рис. 4.** Интерференционная картина для: 1 – изотермического слоя воздуха; 2 – градиента температуры, вызванного нагревом нижнего теплообменника; 3 – начала конвективного течения; 4 – интенсивной конвекции

Как можно заметить при нулевой разности температур интерференционная картина не содержит интерференционных полос (рис 4, 1). Увеличение температуры нагревателя (нижней пластины) при-

водит к возникновению интерферометрической картины (рис. 4, 2), на которой интерференционные полосы соответствуют изолиниям температуры (равная толщина полос говорит о постоянстве градиента температуры по высоте ячейки). При дальнейшем увеличении температуры начинается искривление интерферометрических полос (рис. 4, 3 и 4, 4), что наглядно демонстрирует интенсивную конвекцию в ячейке.

Данные результата наглядно показывают, что все численные оценки были сделаны верно и с помощью изготовленной установки и голографического метода в реальном времени существует возможность наблюдать и изучать конвективные течения в воздухе.

## 6. Заключение

Выполнены численные оценки эффективного числа Рэлея, характеризующего термоконцентрационную конвекцию влажного воздуха. С помощью численных оценок продемонстрирована возможность различать и сопоставлять конвективный теплоперенос во влажном и сухом воздухе в лабораторных условиях. Определены оптимальные технические параметры спроектированной и изготовленной экспериментальной установки для исследования конвекции методом голографической интерферометрии в интервале температур от 5 до 45 °С. Наглядно показано, что благодаря данному методу в реальном времени существует возможность наблюдать и изучать конвективные течения во влажном воздухе.

## Список литературы

1. Lambaerts J., Lapeyre G., Zeitlin V. Moist versus dry barotropic instability in a shallow-water model of the atmosphere with moist convection // *J. Atmos. Sci.* 2011. Vol. 68. N. 6. P. 1234–1252.
2. Yano J., Geleyn J. F., Kohler M. et al. Basic concepts for convection parameterization in weather forecast and climate models // *J. Atmosphere*. 2015. Vol. 6. N. 1. P. 88–147.
3. Chandrasekhar S. *Hydrodynamic and hydromagnetic stability*. Oxford: Clarendon Press, 1961. 652 p.
4. Martynenko O. G., Khramtsov P. P. *Free-convective heat transfer*. Berlin: Springer, 2005. 518 p.
5. Ogura Y. A review of numerical modeling research on small-scale convection in the atmosphere // *Meteorol. Monogr.* 1963. Vol. 5. P. 65–76.
6. Arakawa A., Jung J. H. Multiscale modeling of the moist-convective atmosphere – A review // *Atmos. Res.* 2011. Vol. 102. N. 3. P. 263–285.
7. Derbyshire S. H., Beau I., Bechtold P., et al. Sensitivity of moist convection to environmental humid-

- ity. // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2004. Vol. 130. N. 604. P. 3055–3079.
8. Шмерлин Б. Я., Калашиник М. В. Конвективная неустойчивость Рэлея в присутствии фазовых переходов влаги. Формирование крупномасштабных вихрей и облачных структур // *УФН*. 2013. Т. 183, С. 497–510.
9. Алексеев В. В., Гусев А. М. Свободная конвекция в геофизических процессах // *УФН*. 1983. Т. 141, С. 311–342.
10. Strutt R. J. (*Lord Rayleigh*). On convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side // *Philos. Mag.* 1916. Vol. 32, P. 529–546.
11. Гинзбург Э. И., Гуляев В. Т., Жалковская Л. В. Динамические модели свободной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 290 с.
12. Вукалович М. П. Термодинамические свойства воды и водяного пара. М.: Машиностроение, 1955, 93 с.
13. Goff J. A., Gratch S. Low-pressure properties of water in the range –160 to 212 °F // *Trans. Am. Soc. Heat. Vent. Eng.* 1946. Vol. 52, P. 95–122.
14. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. 930 с.
15. Wilke C. R., Lee C. J. Estimation of diffusion coefficients for gases and vapors // *Ind. Eng. Chem.* 1955. Vol. 47. N. 6. P. 1253–1257.
16. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета. М.: Химия, 1966, 533 с.
17. ГСССД 125-88. Таблицы стандартных справочных данных. Влажный воздух. Теплофизические свойства в диапазоне температур 5...95 °С при давлении 99325 Па. М.: Изд-во стандартов, 1991. 9 с.
18. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
19. Хауф В., Григуль У. Оптические методы в теплоснабжении. М.: Мир, 1973, 242 с.
20. Иоффе Б. Рефрактометрические методы химии. Л.: Химия, 1983, 352 с.

## References

1. Lambaerts J., Lapeyre G., Zeitlin V. Moist versus dry barotropic instability in a shallow-water model of the atmosphere with moist convection. *J. Atmos. Sci.*, 2011, vol. 68, no. 6, pp. 1234–1252.
2. Yano J., Geleyn J. F., Kohler M. et al. Basic concepts for convection parameterization in weather forecast and climate models. *J. Atmosphere*, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 88–147.
3. Chandrasekhar S. *Hydrodynamic and hydromagnetic stability*. Oxford: Clarendon Press, 1961. 652 p.



4. Martynenko O. G., Khrantsov P. P. *Free-convective heat transfer*. Berlin: Springer, 2005. 518 p.
5. Ogura Y. A review of numerical modeling research on small-scale convection in the atmosphere. *Meteorol. Monogr.*, 1963, vol. 5, pp. 65–76.
6. Arakawa A., Jung J. H. Multiscale modeling of the moist-convective atmosphere – A review. *Atmos. Res.*, 2011, vol. 102, no. 3, pp. 263–285.
7. Derbyshire S. H., Beau I., Bechtold P., et al. Sensitivity of moist convection to environmental humidity. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2004, vol. 130, no. 604, pp. 3055–3079.
8. Shmerlin B. Y., Kalashnik M. V. Rayleigh convective instability in the presence of phase transitions of water vapor. The formation of large-scale eddies and cloud structures. *Physics–Uspekhi*, 2013, vol. 56, pp. 473–485
9. Alekseev V. V., Gusev A. M. Free convection in geophysical processes. *Soviet Physics–Uspekhi*, 1983, vol. 26, pp. 906–922
10. Strutt R. J. (Lord Rayleigh). On convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side *Philos. Mag.* 1916. Vol. 32, P. 529–546.
11. Ginzburg E. I., Guliaev V. T., Zhalkovskaia L. V. *Dynamic models of free atmosphere*. Novosibirsk: Nauka, 1987, 290 p. (In Russian).
12. Vukalovich M. P. *Thermodynamic properties of water and steam*. M.: Freud Publishing House, 1973, 71 p.
13. Goff J. A., Gratch S. Low-pressure properties of water in the range –160 to 212 °F. *Trans. Am. Soc. Heat. Vent. Eng.* 1946. Vol.52, P. 95–122.
14. Hirschfelder J. O., Curtiss Ch. F., Bird R. B. *Molecular theory of gases and liquids*. New-York: Wiley, 1954. 1219 p.
15. Wilke C. R., Lee C. J. Estimation of diffusion coefficients for gases and vapors. *Ind. Eng. Chem.* 1955. Vol. 47. N. 6. P. 1253–1257.
16. Bretschneider S. *Properties of gases and liquids. Engineering methods of calculation*. Moscow: Chemistry, 1966, 533 p. (In Russian).
17. GSSSD 125-88. *Tables of standard reference data. Moist air. Thermophysical properties in the temperature range 5...95° C and at pressure 99325 Pa*. Moscow: Stardartinform, 1991. 9 с.
18. Gershuni G.Z., Zhukhovitskii E.M. *Convective stability of incompressible fluid*. Jerusalem: Keter Publishing House, 1976. 330 p.
19. Hauf W., Grigull L. Optical methods in heat transfer. / In: Hartnett J. P., Irvine T. F. Jr. (Eds). *Advances in Heat Transfer*, 1970, vol. 6, pp. 133–366.
20. Ioffe B. *Refractometric methods of chemistry*. Leningrad: Khimia, 1983, 352 p. (In Russian).

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Сомов С. А., Иванов А. С. Исследование термоконцентрационной конвекции во влажном воздухе методом голографической интерферометрии // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. № 2. С. 48–56. doi: 10.17072/1994-3598-2020-2-48-56

**Please cite this article in English as:**

Somov S. A., Ivanov A. S. Study of thermosolutal convection in moist air by holographic interferometry method. Bulletin of Perm University. Physics, 2020, no. 2, pp. 48–56. doi: 10.17072/1994-3598-2020-2-48-56