

УДК 536.25

П.В. Антонов<sup>1</sup>, В.А. Арбузов<sup>1,2</sup>, В.С. Бердников<sup>1,2</sup>, В.А. Гришков<sup>1</sup>, О.Н. Новоселова<sup>1,2</sup>,  
В.В. Тихоненко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия,  
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, E-mail: berdnikov@itp.nsc.ru

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Россия,  
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПЛАВУЧИХ СТРУЙ

*Экспериментально и численно исследовано возникновение и развитие плавучих струй над внезапно включенным линейным источником тепла в сильновязкой жидкости с числом Прандтля равным 2700. Исследована эволюция во времени пространственной формы течения, полей температуры и скорости в зависимости от подводимой мощности.*

ТЕРМОГРАВИТАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ, ЛИНЕЙНЫЙ ИСТОЧНИК ТЕПЛА, СТРУЯ, ПОЛЯ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ, ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ, ГИЛЬБЕРТ-ОПТИКА

### ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований установившихся и нестационарных струйных течений с учетом эффекта плавучести необходимы для анализа задач геофизической гидродинамики и экологии [1,2]. Ещё одной быстро развивающейся областью применения теории плавучих струй является глобальная геодинамика, в рамках которой интенсивно развивается численное и физическое моделирование термических и термохимических мантийных плюмов и зон субдукции [3]. Термогравитационные струи над линейным источником могут быть моделью подъемного течения в зоне спрединга. Одна из методических проблем в решении задач геодинамики – это отсутствие достоверных данных о теплофизических и реологических свойствах вещества мантии Земли на больших глубинах. Например, оценки значений вязкости отличаются на несколько порядков. Экспериментальные исследования на лабораторных моделях должны проводиться за относительно короткие времена в отличие от реальных медленно протекающих геодинамических процессов, но должны быть адекватными по физической природе. Поэтому комплексные численные и экспериментальные исследования должны помочь так же в выборе реологических свойств жидкостей или текучих сред – имитаторов вещества мантии. Ниже представлены результаты физического эксперимента и численного моделирования эволюции плавучей струи над линейным источником тепла в жидкости – ПЭС-5 с числом Прандтля 2700 при 20°C [4], что позволило при разумных временах экспериментов исследовать особенности медленных течений. Исследована эволюция во времени пространственной формы течения, полей температуры и скорости после включения нагрева постоянным электрическим током тонкой проволоки. Эксперименты проводились на двух установках. На первой проводилась визуализация течения жидкости с помощью частиц-маркеров и светового ножа и видеосъемка течения цифровой камерой с последующей компьютерной обработкой

видеофильмов. На второй установке исследовалась эволюция тепловых полей методами гильберт-оптики [5,6].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Принципиальная схемы экспериментальных установок показаны на рисунках 1 и 2.

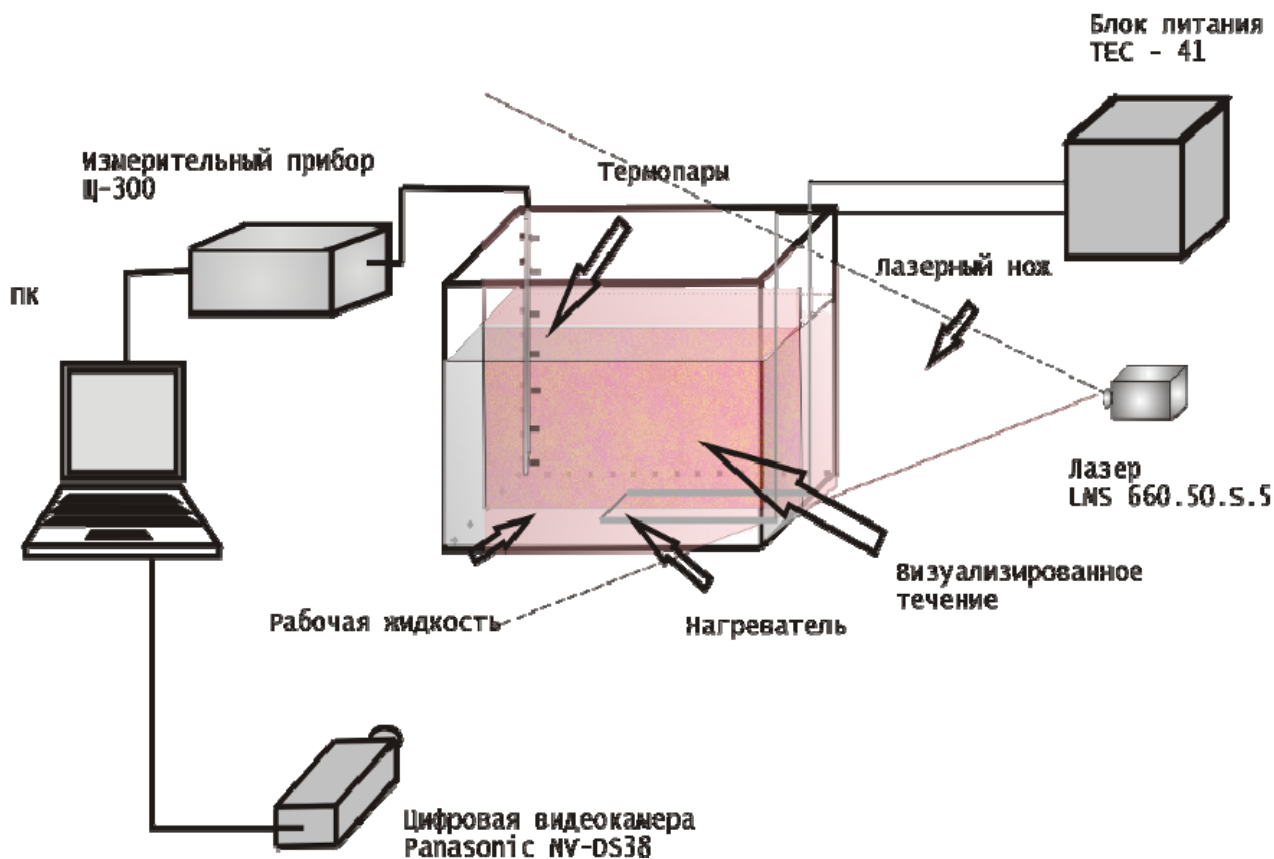


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для визуализации течения жидкости с помощью частиц-маркеров и светового ножа

Прямоугольная полость имеет прозрачные стенки, которые поддерживаются при постоянной температуре. Рабочий участок с прозрачными стенками позволяет вести наблюдения и видеосъемку течения без оптических искажений. Внутренние размеры полости длина  $\times$  высота  $\times$  ширина =  $300 \times 250 \times 60$  мм<sup>3</sup>. На высоте 5 мм от дна в центральном по длине сечении находится константановая проволочка диаметром 0,175 мм и длиной 55 мм. Нагрев проволочки осуществляется постоянным током от стабилизированного источника питания ТЕС-41 с точностью регулировки  $\pm 0,01$  А. Течение прозрачной жидкости визуализировалось алюминиевыми частичками-чешуйками размерами 10 – 20 мкм. Подсветка проводилась лазерной «световой плоскостью» в центральном по ширине полости сечении. Видеосъемка выполнялась CCD камерой со скоростью 25 кадров/с. Результаты обрабатывались с помощью специального программного обеспечения, которое позволяет создавать фильмы процесса с различными масштабами времени, получать векторные поля скорости, представлять полученные данные в виде профилей компонент скорости и изолиний.

Оптическая схема второй экспериментальной установки на базе интерференционно-теневого прибора ИАБ-463М приведена на рис. 2. Визуализация слабых возмущений полей оптической плотности при низких градиентах температуры осуществлялась методами оптической гильберт-диагностики с использованием модифицированной системы оптической фильтрации в сочетании с щелевым полихроматическим источником освещения.

Поле зрения оптической системы ИАБ–463М имеет диаметр 400 мм. Регистрация гильберт-тенеграмм выполнялась зеркальным цифровым фотоаппаратом Canon EOS 350D.

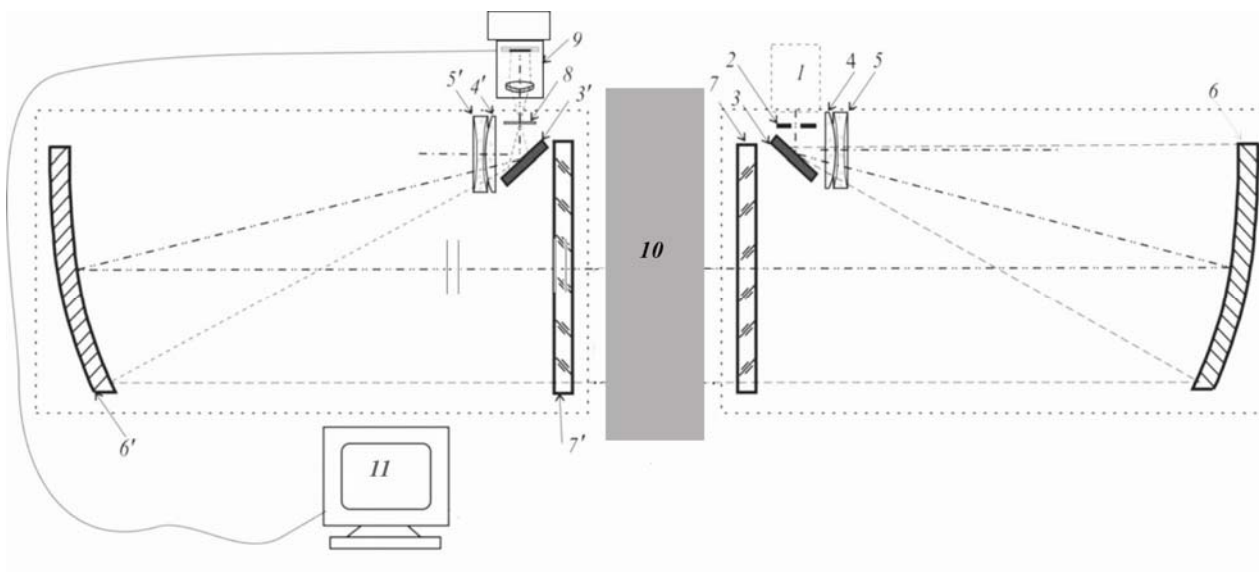


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования эволюции тепловых полей методами гильберт-оптики: 1 – осветительный узел; 2 – регулируемая щелевая диафрагма; 3, 3' – диагональные зеркала; 4, 5 и 4', 5' – элементы афокальных компенсаторов; 6, 6' – сферические коллиматорные зеркала; 7, 7' – защитные плоскопараллельные стекла коллиматоров; 8 – квадрантный фильтр Гильберта; 9 – цифровой фотоаппарат; 10 – рабочий объём; 11 – персональный компьютер

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты проводились при высоте слоя жидкости 230 мм и дискретных значениях мощности нагревателя (таблица 1).

Таблица 1. Основные режимы.

| Номер режима   | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|--|-------|------|------|------|------|------|
| Мощность нагревателя, Вт/м   | 0,41  | 1,8  | 7,1  | 28   | 110  | 260  |
| Число Грасгофа $Gr = \beta g q L^3 / c_{pp} \rho v^3$                        | 2,47  | 10,7 | 42,9 | 172  | 686  | 1548 |
| Время выхода струи на поверхность в секундах                                 | 6500  | 3200 | 680  | 212  | 93   | 56   |
| Кинетическая энергия в момент выхода струи на поверхность $10^{-10}$ , Дж/мм | 0,225 | 1,32 | 9,65 | 45   | 145  | 554  |
| Максимальное значение скорости, мм/с   | 0,1   | 0,28 | 0,6  | 1,26 | 2,67 | 4,85 |
| Положение максимального значения скорости, мм                                | 22    | 55   | 77   | 99   | 110  | 110  |

На рисунках 3 и 4 показана эволюция структуры течения во времени для минимальной (режим 1) и максимальной (режим 6) мощностей нагревателя в расчете на единицу длины в данной серии экспериментов на установке, приведенной на рис. 1.



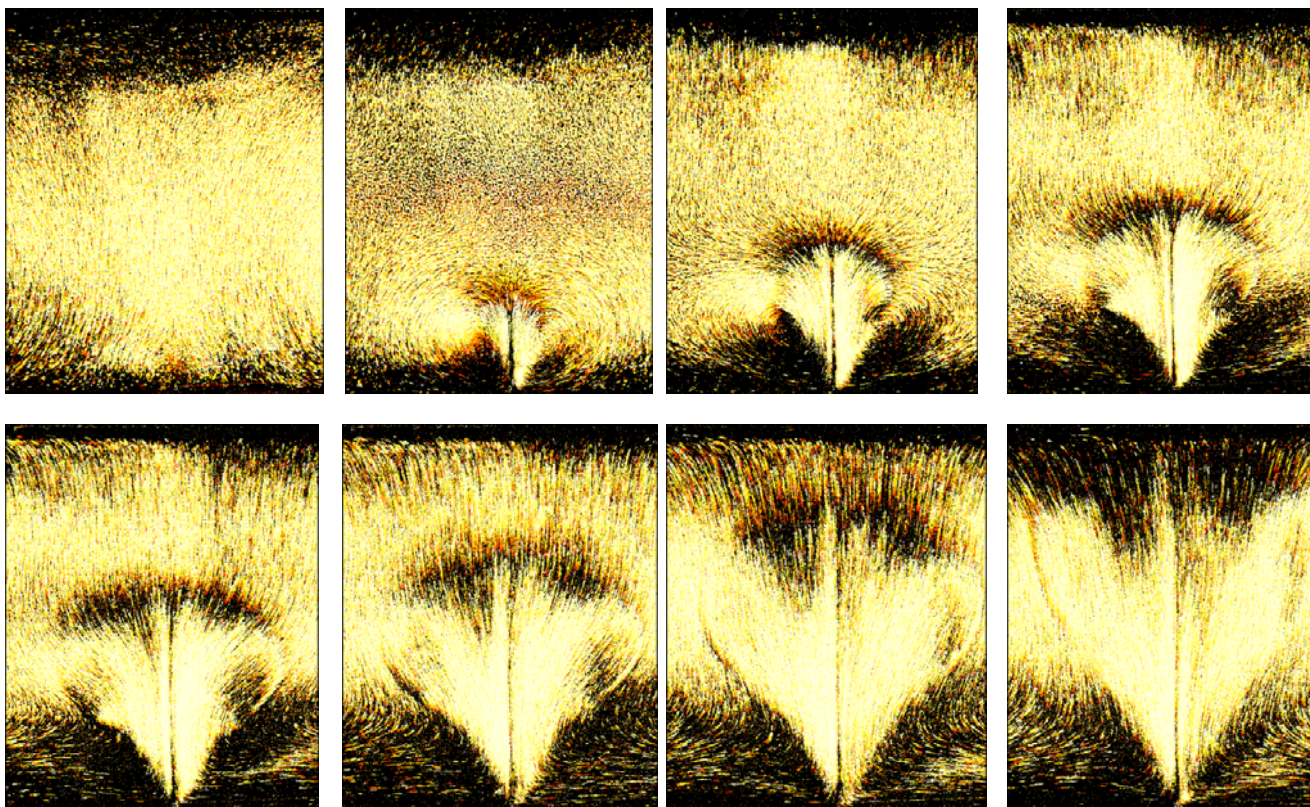


Рис. 3. Эволюция структуры течения при мощности нагревателя 0,41 Вт/м. Интервал времени между соседними кадрами 960 с

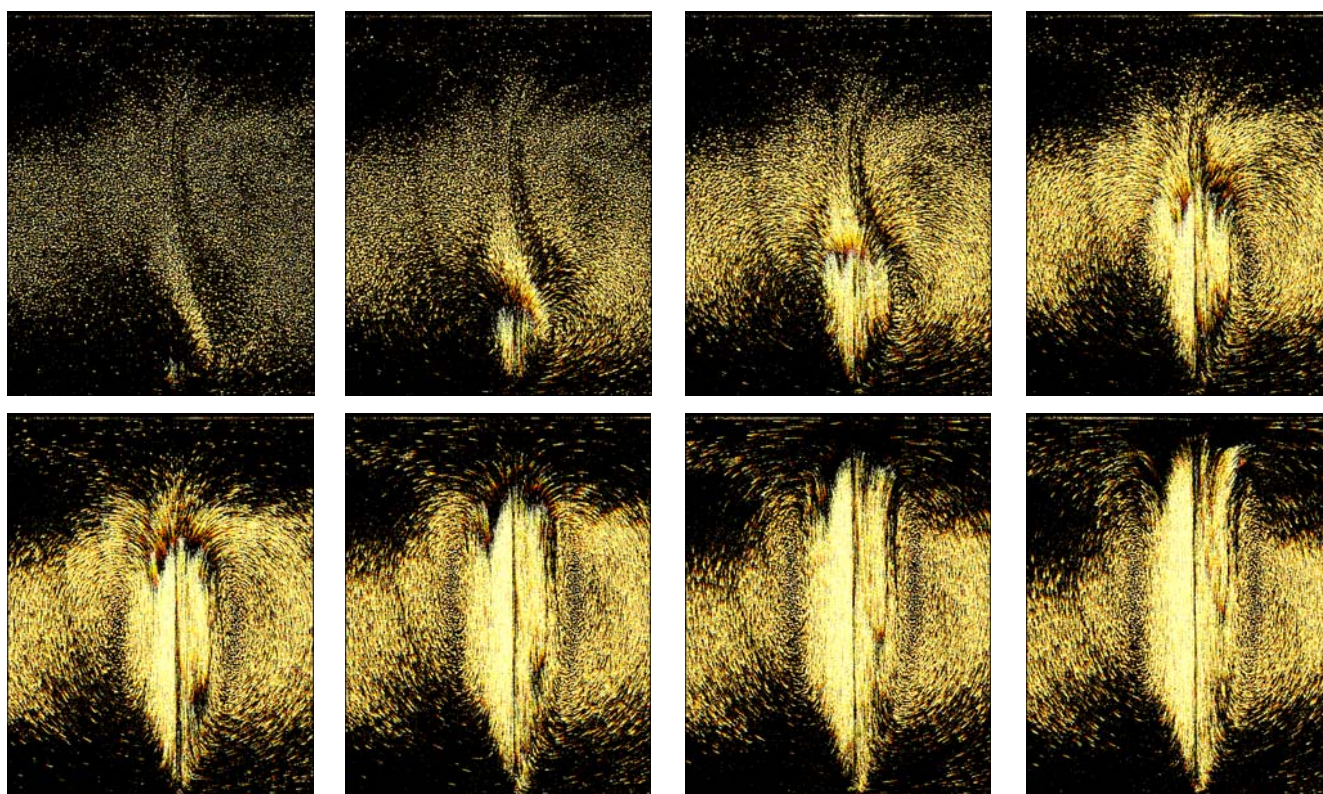


Рис. 4. Эволюция структуры течения при мощности нагревателя 260 Вт/м. Интервал времени между соседними кадрами 8 с



Поскольку жидкость имеет большую вязкость, то после выключения нагревателя течение затухает быстро, но надолго сохраняются следы предыдущей структуры течения. Такой «вмороженный след» виден на первых кадрах рис. 4.

На рисках 5 и 6 показана эволюция теплового возмущения для режимов 1 и 4 (см. таблицу 1), полученных на установке, приведенной на рис. 2.

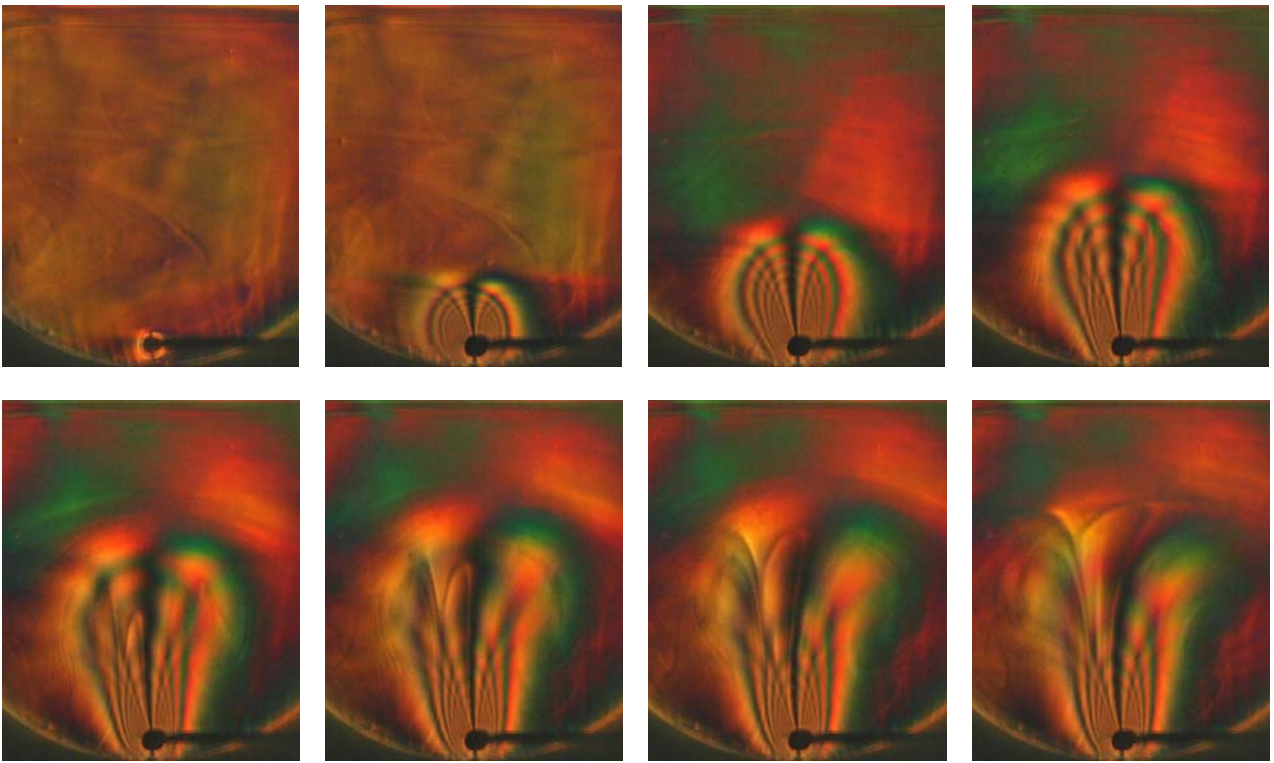


Рис. 5. Эволюция теплового возмущения при мощности нагревателя 0,41 Вт/м. Интервал времени между соседними кадрами 200 с

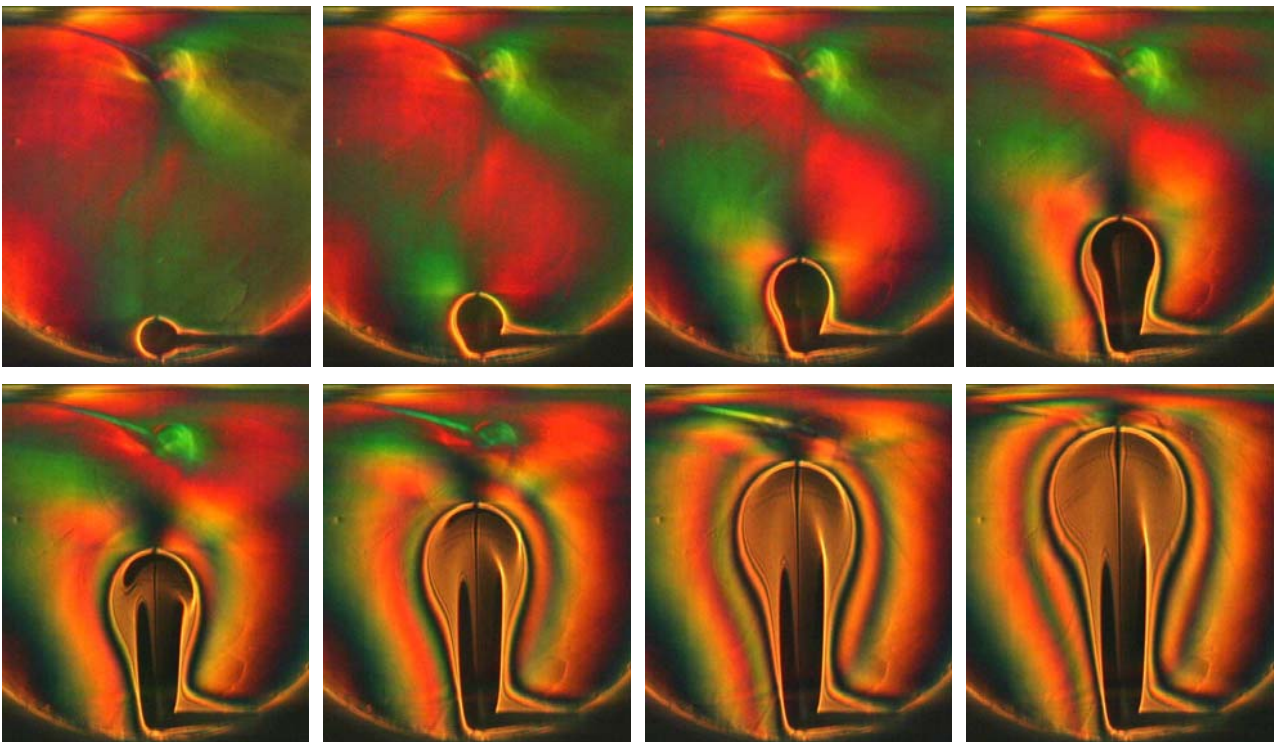


Рис. 6. Эволюция теплового возмущения при мощности нагревателя 28 Вт/м. Интервал времени между соседними кадрами 10 с

Включение нагревателя в каждой серии экспериментов проводилось после затухания движения и выравнивания температуры. Распределение температуры по высоте слоя в течение всего эксперимента записывалось с гребенки термпар (рис. 1). Поскольку мощности нагревателя были относительно небольшие, полученные результаты соответствуют развитию струй в изотермической не стратифицированной по плотности среде. Обобщающие экспериментальные данные представлены в таблице 1 и на рисунках. На рис. 7 показаны темпы продвижения переднего фронта термика (в геодинамических задачах - плюма) после включения подогрева в зависимости от мощности нагревателя и соответственно времени выхода плюма на верхнюю свободную поверхность жидкости в режимах: 1 –  $P = 0,41$  Вт/м,  $t_{\text{ВЫХ}} = 6500$  с; 2 –  $P = 1,8$  Вт/м,  $t_{\text{ВЫХ}} = 3200$  с; 3 –  $P = 7,1$  Вт/м,  $t_{\text{ВЫХ}} = 680$  с; 4 –  $P = 28$  Вт/м,  $t_{\text{ВЫХ}} = 212$  с; 5 –  $P = 110$  Вт/м,  $t_{\text{ВЫХ}} = 93$  с; 6 –  $P = 260$  Вт/м,  $t_{\text{ВЫХ}} = 56$  с. На рис. 7 время нормировано на интервал времени от момента включения нагрева источника до момента выхода головной части струи на поверхность слоя жидкости (Таблица 1).

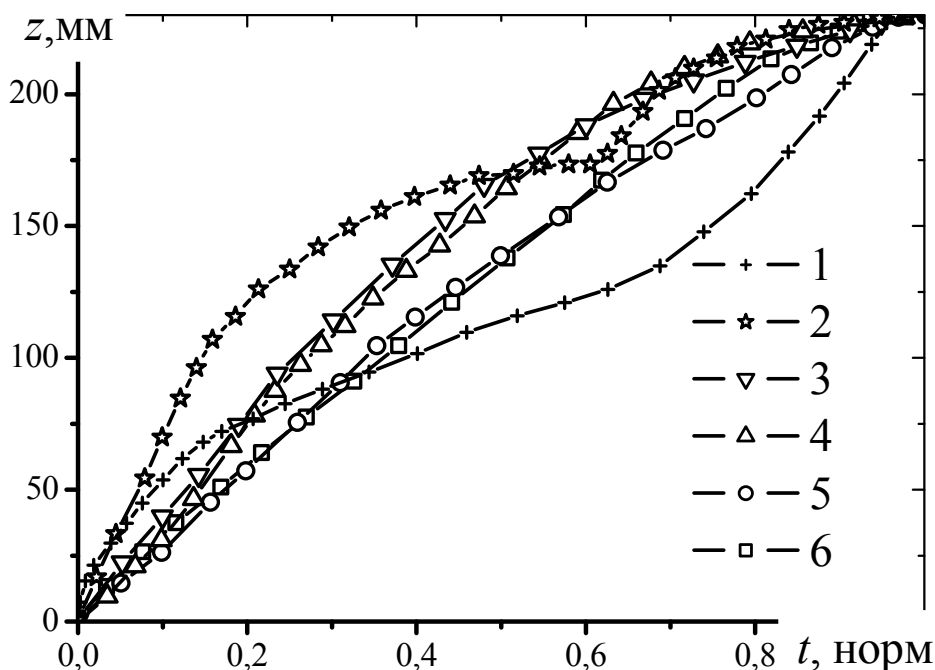


Рис. 7. Зависимости положения переднего фронта плюма от времени и мощности источника тепла: 1 – 0,41; 2 – 1,8; 3 – 7,1; 4 – 28; 5 – 110; 6 – 260 Вт/м

Можно провести анализ сценариев развития структуры течения во времени при различных мощностях нагрева и сделать количественные оценки пространственно-временной

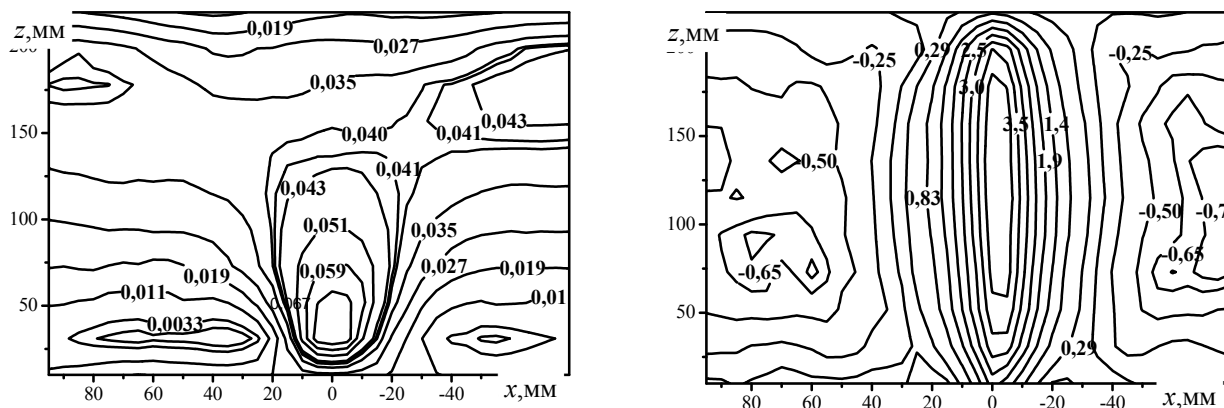


Рис. 8. Изолинии вертикальных компонент скорости в мм/с: слева режим 1, справа режим 6

зависимости компонент скорости и их градиентов. При мощностях нагрева  $P \leq 2$  Вт/м характер развития струи существенно отличается от случая относительно больших мощностей, что хорошо видно на рисунках 3 – 10. При малых мощностях вначале прогревается ярко выраженный цилиндрический слой жидкости (рис. 5 – верхний ряд, справа), затем медленно формируется локализованный термик, подтягивающий жидкость в восходящий поток только из ближайшей окрестности (рис. 3). Когда прогревается достаточно большой объем жидкости, он весь начинает медленно всплывать (рис. 3, 5), равномерно вытесняя вышележащий слой жидкости вверх (как поршень). Профили скорости в сечениях над головной частью термика (теплового плюма) плоские (рис. 8 - слева). Всплывающий объем жидкости непрерывно подпитывается снизу струйкой подогретой жидкости. Наблюдение показывает, что подводимое тепло недостаточно для формирования интенсивной плавучей струи. За счет теплоотвода в режиме молекулярной теплопроводности на периферии низкоскоростной струи и от переднего фронта термика в окружающий неподвижный массив теряется необходимый для всплытия запас плавучести. Далее возникает слабоинтенсивная струя с выходом восходящего потока на свободную поверхность слоя жидкости.

При больших мощностях быстро развивается устойчивая струя (рис. 4, 6). При этом отличаются закономерности начального прогрева жидкости вблизи источника и зависимости амплитуды вертикальной компоненты скорости от высоты (рис. 9) на оси струи.

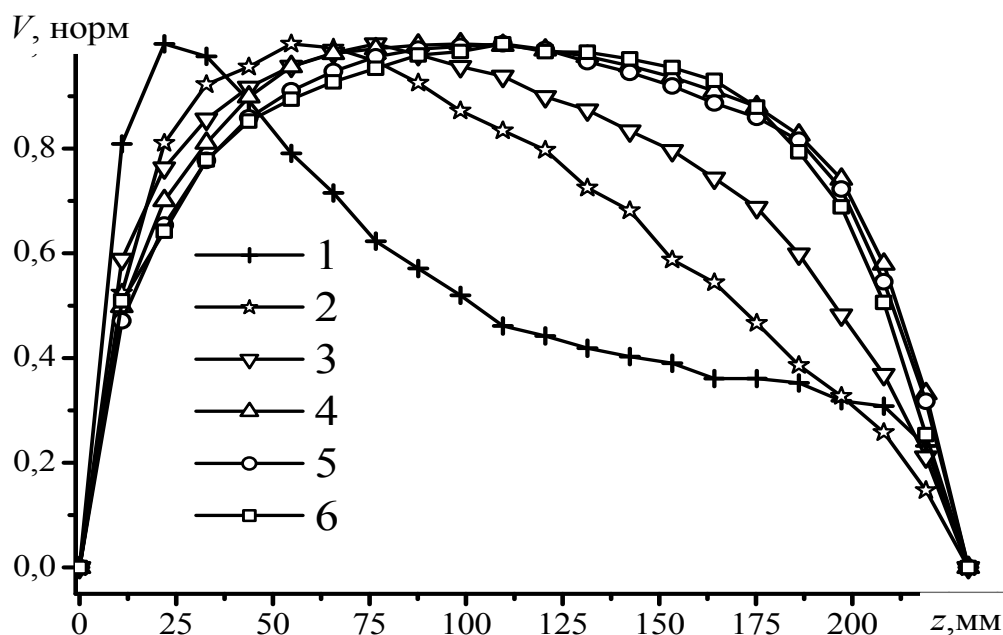


Рис. 9. Зависимости нормированной амплитуды скорости от продольной координаты и от мощности источника тепла (1 –  $P = 0,41$  Вт/м,  $V_m = 0,1$  мм/с; 2 –  $P = 1,8$  Вт/м,  $V_m = 0,28$  мм/с; 3 –  $P = 7,1$  Вт/м,  $V_m = 0,6$  мм/с; 4 –  $P = 28$  Вт/м,  $V_m = 1,26$  мм/с; 5 –  $P = 110$  Вт/м,  $V_m = 2,67$  мм/с; 6 –  $P = 260$  Вт/м,  $V_m = 4,85$  мм/с)

Для больших мощностей вертикальная компонента скорости монотонно нарастает, выходит практически на «полочку» и падает вблизи верхней границы (рис. 9, кривые 4–6). Для малых мощностей она достигает максимума на некотором расстоянии от дна и затем резко уменьшается (рис. 9, кривые 1,2). При этом струи приобретают большие поперечные сечения (рис. 10, кривые 1,2) и теряют подъемную скорость из-за потерь тепла в окружающее пространство по причине высокого вязкого трения. Т.о. плюм может просто затухнуть и не иметь выхода на свободную поверхность (рис. 8, слева и рис. 5). Сценарии развития струй при малых мощностях источников тепла зависят от высоты слоя и от свойств жидкости, потому что для формирования медленно всплывающего массива в головной части требуется необходимое пространство над ней. В случае достаточной мощности зависимость от высоты слоя практически исчезает. Что такое достаточная мощность можно понять из

рис. 10, где кривые 1–2 имеют качественно другой характер в сравнении с кривыми 3–6, которым соответствуют относительно высокие плотности мощности источника тепла.

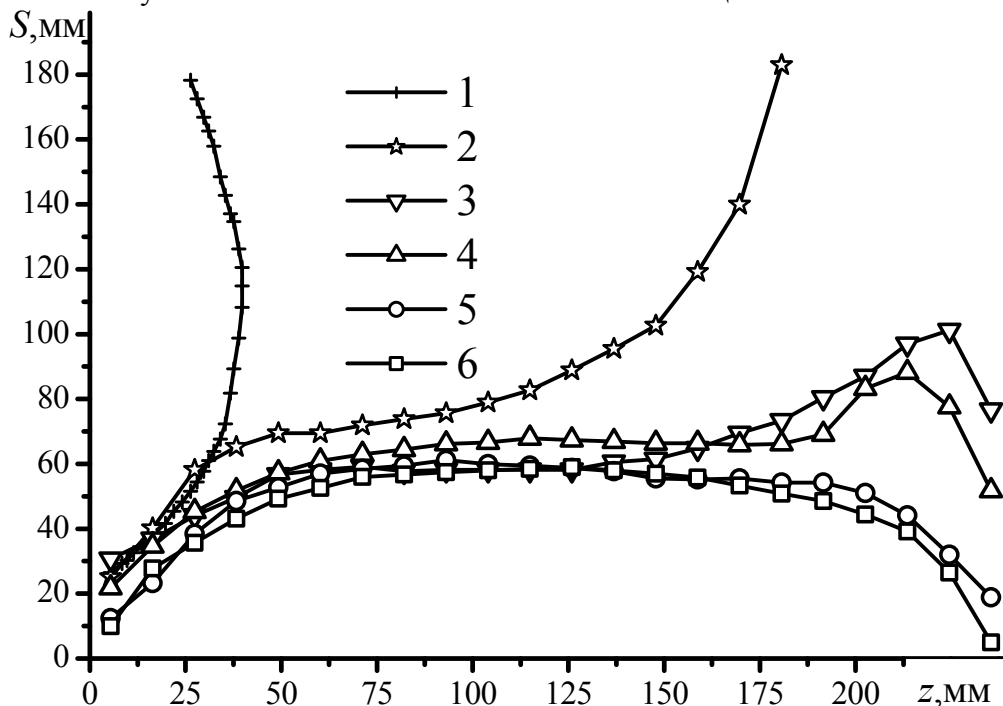


Рис. 10. Зависимости сечения струи от продольной координаты. Режим 1 – 6 (см. таблицу 1). Установившееся течение

Для рассматриваемых задач важным вопросом является определение доли от общего количества тепла, выделенного на нагревателе, идущей на генерацию конвективного течения и трансформированной в кинетическую энергию жидкости [7]. Количество тепла за промежуток времени от включения нагрева до момента выхода струи на верхнюю границу слоя рассчитывалась, исходя из произведения мощности нагревателя на единицу его длины и соответствующий интервал времени (рис. 11). Видно, что для малых мощностей нагрева эта зависимость имеет сложную форму и переходит в линейную при больших мощностях нагрева.

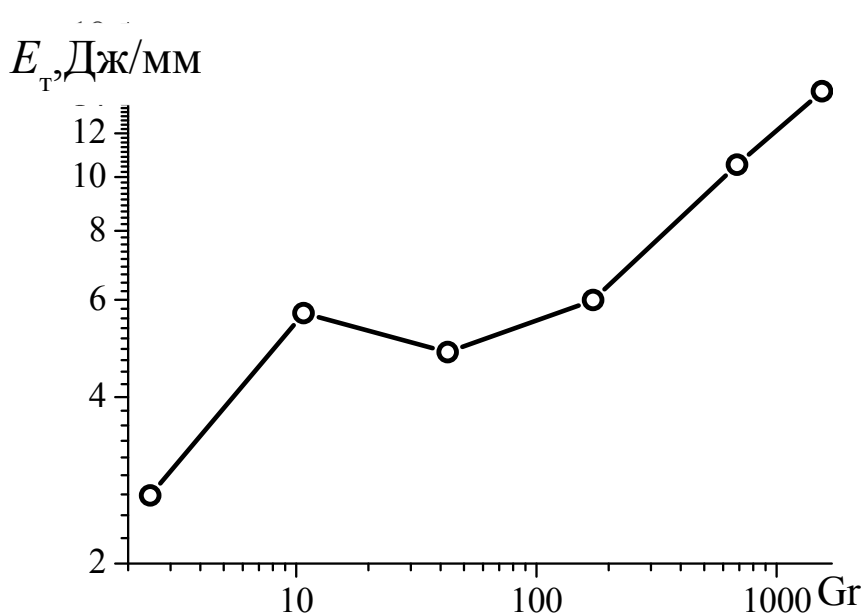


Рис. 11. Тепловая энергия поглощённая вертикальным слоем жидкости единичной толщины, перпендикулярным нагревателю к моменту выхода струи на поверхность



Для расчетов кинетической энергии обрабатывались видеофильмы движения жидкости в плоскости, перпендикулярной нагревателю. Отснятые кадры разбивались на ячейки размерами 32x8 пикселей. Затем находился модуль мгновенного вектора скорости в каждой такой ячейке. Кинетическая энергия каждой ячейки определялась по классической формуле. Общая кинетическая энергия жидкости в слое единичной толщины (1 мм) находилась путем сложения по всем ячейкам. На рис. 12 видно, что кинетическая энергия примерно линейно зависит от мощности нагрева во всём исследованном диапазоне.

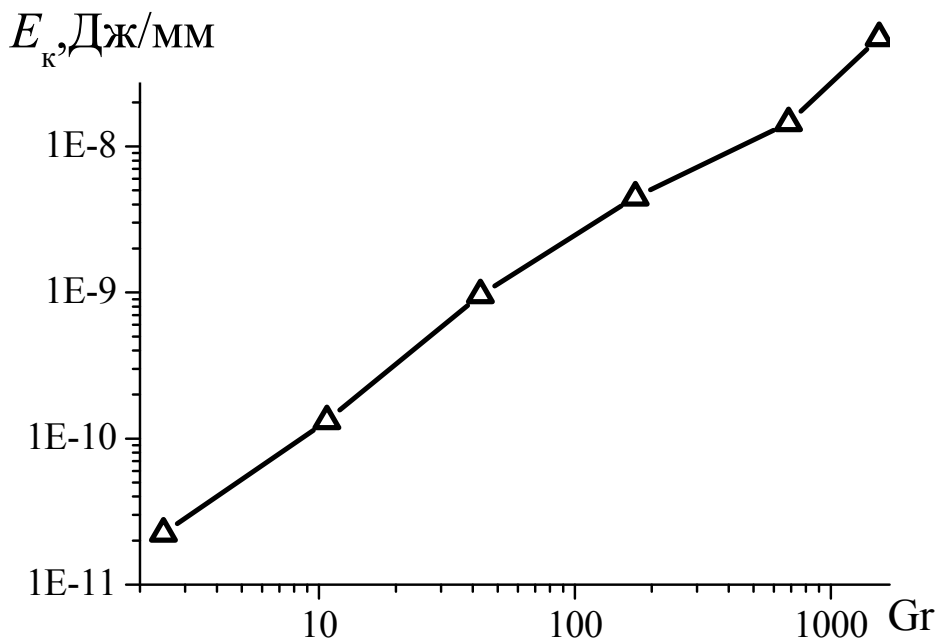


Рис. 12. Кинетическая энергия, накопленная вертикальным слоем жидкости перпендикулярным нагревателю к моменту выхода струи на поверхность

По приведенным данным можно рассчитать к.п.д. преобразования подведенного тепла в кинетическую энергию. Аналогичные данные можно получить при обработке результатов численного моделирования течения в условиях, аналогичных экспериментальным.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Численно задача решена в декартовой системе координат в прямоугольной области в предположении, что течение имеет двумерную структуру. Решалась полная система уравнений нестационарной термогравитационной конвекции в переменных вихрь, функция тока, температура в приближении Буссинеска и с учетом зависимости вязкости от температуры. Тепло, выделяемое на проволочке, моделировалось дельта-функцией в уравнении энергии. Считалось, что стенки полости полностью теплоизолированы, а верхняя свободная граница недеформируемая. На боковых поверхностях и на дне задавались условия прилипания. Использовалась явная конечно-разностная схема с разностями против потока, имеющая первый порядок аппроксимации по времени и второй по пространству. Пространственная сетка содержала 481x369 узлов.

На рис. 11 показаны изолинии функции тока (слева) и изотермы (справа) в различные моменты времени. На рис. 12 показано сравнение изолиний вертикальной составляющей скорости, полученных в физическом эксперименте и при численном моделировании для режима 3. Рассчитанные поля скорости качественно совпадают с экспериментальными профилями вертикальной компоненты скорости. Время выхода струи на свободную поверхность жидкости отличается от полученного экспериментально на 10 – 15 процентов.

В случае малой мощности источника численные результаты плохо согласуются с экспериментальными как без учета, так и с учетом зависимости вязкости от температуры.

Наиболее вероятное объяснение заключается в том, что система уравнений в приближении Буссинеска не описывает низкоскоростные течения сильновязкой жидкости.

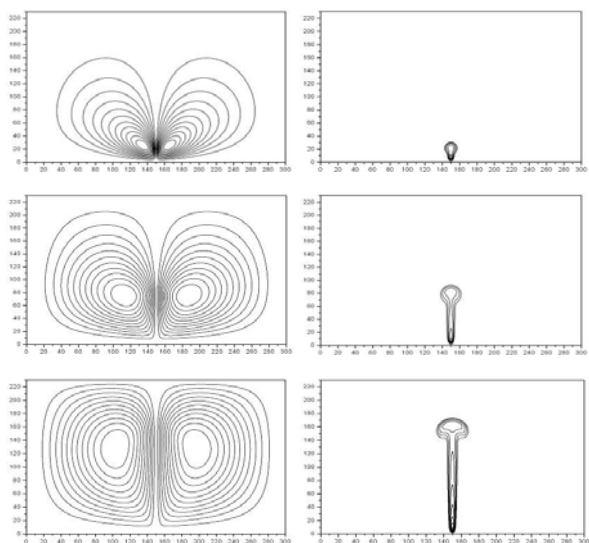


Рис. 13. Изолинии функции тока - слева и изотермы - справа для режима 3 в различные моменты времени

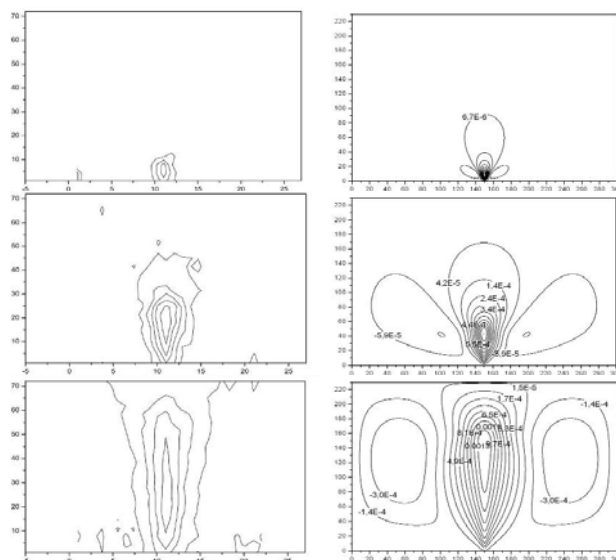


Рис. 14. Изолинии вертикальной составляющей скорости эксперимент – слева и расчеты – справа для режима 3 в различные моменты времени

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально и численно изучено развитие струй термогравитационной природы в сильновязкой жидкости над внезапно включенным линейным источником тепла. Показано, что при малых мощностях источника, низких темпах развития струй и низких скоростях течения приближение Буссинеска не выполняется. При достаточно больших мощностях источника результаты физического и численного экспериментов совпадают качественно и количественно с погрешностью до 10-15 %. Численно хорошо определяются основные закономерности эволюции полей температуры и развития термиков на начальном этапе. Сочетание различных методов оптической диагностики позволило получить новые уникальные данные о закономерностях развития плавучих струй. Эксперименты и расчеты проведены на полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-5, теплофизические свойства которой приведены в таблице 2.

Таблица 2. Теплофизические параметры полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-5 [4]

| T, °C | $\lambda$ , Вт/м·град | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $C_p$ , кдж/кг·град | $\nu \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с | $\beta$ , 1/К           | Pr      |
|-------|-----------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------|
| 20    | 0.157                 | 998                        | 1.586               | 267.8                                 | $-6,964 \times 10^{-4}$ | 2705.29 |
| 40    | 0.154                 | 984.1                      | 1.622               | 143.6                                 |                         | 1512.46 |
| 60    | 0.152                 | 970.6                      | 1.658               | 83.61                                 |                         | 912.01  |
| 80    | 0.149                 | 956.8                      | 1.694               | 52.85                                 |                         | 600.86  |
| 100   | 0.146                 | 943                        | 1.729               | 32.92                                 |                         | 389.85  |

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была выполнена при финансовой поддержке СО РАН (проекты №№ 52-2006, 21-2009) и РФФИ (проекты: № 09-08-00882; 10-08-00813).

## ОБОЗНАЧЕНИЯ

$Gr = \beta g q_1 L^3 / c_p \rho_0 \nu^3$  – число Грасгофа;

$\beta$  – коэффициент теплового объемного расширения;

$g$  – ускорение силы тяжести;

$q_1$  – удельное тепловыделение на источнике (табл. 1);

$L$  – горизонтальный размер рабочего участка установки 1;

$c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении;

$\rho_0$  – плотность жидкости при начальной температуре;

$\nu$  – кинематическая вязкость;

$Pr = \nu / a$  – число Прандтля;

$a = \lambda / \rho c_p$  – коэффициент температуропроводности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды // М.: Мир. 1980. 549 с.
2. Гебхарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р., Саммакия Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен // Кн. 2. М: Мир. 1991. 528с.
3. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика // Новосибирск: Издательство СО РАН, филиал “Гео”. 2001. 409 с.
4. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей // М.: Наука, 1972. 720 с.
5. Арбузов В.А., Дубнищев Ю.Н. Методы гильберт-оптики в измерительных технологиях // Новосибирск: Издательство НГТУ, 2007. 316с.
6. Дубнищев Ю.Н. Теория и преобразование сигналов в оптических системах // Новосибирск: Издательство НГТУ, 2008, 403с.
7. Голицын Г.С. Исследования конвекции с геофизическими приложениями и аналогиями // Ленинград: Гидрометеиздат. 1980. 56с.

P.V. Antonov<sup>1</sup>, V.A. Arbuzov<sup>1,2</sup>, V.S. Berdnikov<sup>1,2</sup>, V.A. Grishkov<sup>1</sup>, O.N. Novoselova<sup>1,2</sup>,  
V.V. Tikhonenko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Kutateladze institute of thermophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentyev ave., 1,  
E-mail: berdnikov@itp.nsc.ru*

<sup>2</sup>*Novosibirsk state technical university, Russia, 630092, Novosibirsk, K.Marx avenue, 20*

## EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SIMULATION OF BUOYANCY PLUMS

*Observationally also occurrence and development of floating streams over suddenly included line source of heat in fluid with Prandtl number equal 2700 is simulated. Evolution of the spatial flow structure, temperature and velocity fields as function of brought power is explored.*

THERMOGRAVITATIONAL CONVECTION, THE LINEAR RADIANT OF HEAT, STREAM, VELOCITY AND TEMPERATURE FIELDS, OPTICAL DIAGNOSTICS OF STREAMS, HILBERT-OPTICS