

УДК 536.25

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПЛАВУЧИХ СТРУЙ*****П. В. Антонов¹, В. А. Арбузов^{1,2}, В. С. Бердников^{1,2}, В. А. Гришков¹,
О. Н. Новоселова^{1,2}, В. В. Тихоненко^{1,2}**

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»,
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: berdnikov@itp.nsc.ru

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

Ключевые слова: термогравитационная конвекция, линейный источник тепла, струя, поля скорости и температуры, оптическая диагностика потоков, гильберт-оптика.

Введение. Исследования установившихся и нестационарных струйных течений с учётом эффекта плавучести необходимы для анализа задач геофизической гидродинамики и экологии [1, 2]. Ещё одной областью применения теории плавучих струй является глобальная геодинамика, в рамках которой интенсивно развиваются численное и физическое моделирование термических и термохимических мантийных плюмов и зон субдукции [3, 4]. Термогравитационные струи над линейным источником могут быть моделью подъёмного 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 различаются на несколько порядков. Экспериментальные исследования на лабораторных моделях должны проводиться за относительно короткие времена в отличие от реальных медленно протекающих геодинамических процессов, но быть адекватными по физической природе. Комплексные численные и экспериментальные исследования оказывают помощь также в выборе реологических свойств жидкостей или текучих сред — имитаторов вещества мантии.

Цель данной работы — провести сравнение результатов физического эксперимента и численного моделирования эволюции плавучих струй над линейным источником тепла различной мощности в высоковязкой полиэтилсилоксановой жидкости (ПЭС-5) с числом Прандтля $Pr = 2700$ при $T = 20$ °С [5] для изучения особенностей быстро развивающихся и медленных течений при разумных временах экспериментов, а также пространственной формы течения, полей температуры и скорости после включения нагрева постоянным электрическим током тонкой константовой проволоочки.

*Работа выполнена при частичной поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта Сибирского отделения РАН (№ 87-2012).

Таблица 1

$T, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{град}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_P, \text{кДж/кг}\cdot\text{град}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta, 1/\text{K}$	Pr
20	0,157	998,0	1,586	267,8	$-6,964 \cdot 10^{-4}$	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	943,0	1,729	32,92	—	389,85

Экспериментальные исследования проводились на двух установках. На первой осуществлялись визуализация течения жидкости с помощью частиц-маркеров и светового ножа и видеосъёмка течения цифровой камерой с последующей компьютерной обработкой видеоплёнок. На второй установке изучалась эволюция тепловых полей методами гильберт-оптики [6, 7]. Параллельно было выполнено численное моделирование термогравитационной конвекции. Геометрия расчётной области соответствовала условиям эксперимента. Эксперименты и расчёты проведены на ПЭС-5, теплофизические свойства которой приведены в табл. 1 (ρ_0 — плотность жидкости при начальной температуре; C_P — теплоёмкость при постоянном давлении; ν — кинематическая вязкость; β — коэффициент теплового объёмного расширения).

Принципиальные схемы экспериментальных установок показаны на рис. 1 и в работе [8, рис. 3]. Прямоугольная полость имеет прозрачные стенки, температура которых поддерживается постоянной. Рабочий участок с прозрачными стенками позволяет вести наблюдения и видеосъёмку течения без оптических искажений. Внутренние размеры полости $300 \times 250 \times 60$ мм. 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 размером 10–20 мкм. Подсветка проводилась лазерной «световой плоскостью» в центральном по ширине полости сечении. Видеосъёмка выполнялась CCD-камерой со скоростью 25 кадр./с. Результаты обрабатывались с помощью специального программного обеспечения, которое позволяет создавать фильмы процесса

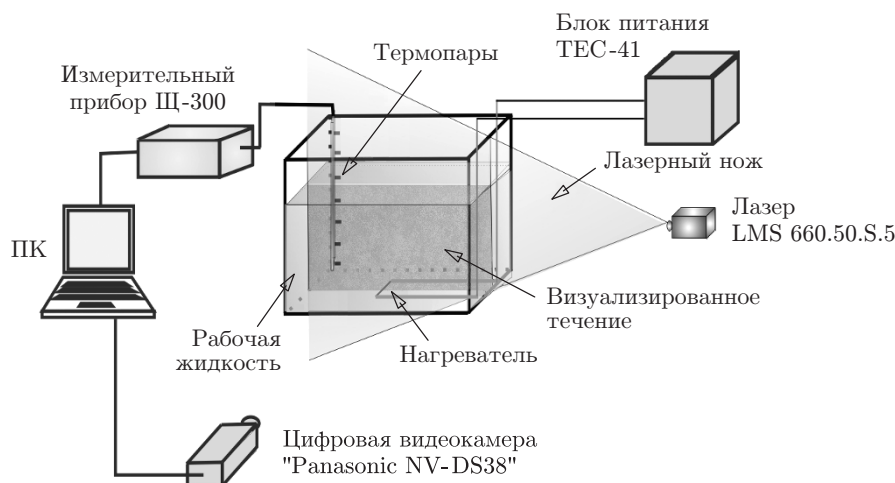


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для визуализации течения жидкости с помощью частиц-маркеров и светового ножа

Таблица 2

Номер режима	Мощность нагревателя, Вт/м	Число Грасгофа $Gr = \frac{\beta g q_l L^3}{C_P \rho_0 \nu^3}$	Время выхода струи на поверхность, с	Кинетическая энергия в момент выхода струи на поверхность, 10^{-10} Дж/мм	Максимальное значение скорости, мм/с	Положение максимального значения скорости, мм
1	0,41	2,47	6500	0,225	0,1	22
2	1,8	10,7	3200	1,32	0,28	55
3	7,1	42,9	680	9,65	0,6	77
4	28	172	212	45	1,26	99
5	110	686	93	145	2,67	110
6	260	1548	56	554	4,85	110

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 в [8]. Визуализация слабых возмущений полей оптической плотности при низких градиентах температуры осуществлялась методами оптической гильберт-диагностики с использованием модифицированной системы оптической фильтрации в сочетании со щелевым полихроматическим источником освещения. Поле зрения оптической системы ИАБ-463М имеет диаметр 400 мм. Регистрация гильберт-тенеграмм выполнялась зеркальным цифровым фотоаппаратом "Canon EOS 350D".

Эксперименты проводились при высоте слоя жидкости 230 мм и дискретных значениях мощности нагревателя (табл. 2).

На рис. 2 и 3 показана эволюция структуры течения во времени для минимальной (режим 1) и максимальной (режим 6) мощностей нагревателя в расчёте на единицу длины в данной серии экспериментов на установке, приведённой на рис. 1. 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. 3.

На рис. 4 и 5 представлена эволюция теплового возмущения для режимов 1 и 4 (см. табл. 2), полученных на установке, приведённой в [8]. Алгоритм расшифровки гильберт-тенеграммы включает в себя следующие процедуры: скелетизацию полос гильберт-тенеграммы (выполняется с помощью графической программы с использованием инструмента Безье), определение исходного фазового распределения по количеству пересечений полос гильберт-тенеграммы с сечением. Результаты обработки представляют собой распределение фазы в струе в заданном сечении. На рис. 6 показан пример расшифровки тенеграмм [6, 7] и профиль температуры по сечению струи.

Включение нагревателя в каждой серии экспериментов проводилось после затухания движения и выравнивания температуры. Распределение температуры по высоте слоя в течение всего эксперимента записывалось с гребёнки термопар (см. рис. 1). Поскольку мощности нагревателя были относительно небольшие, полученные результаты соответствуют развитию струй в изотермической не стратифицированной по плотности среде.

На рис. 7 показаны темпы продвижения переднего фронта термика (в геодинимических 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 —

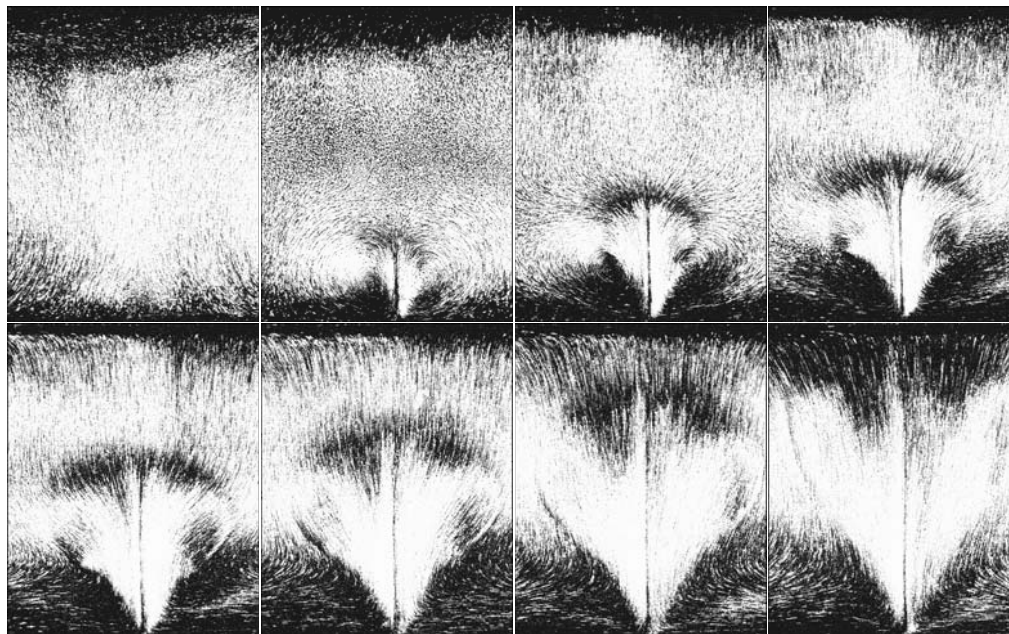


Рис. 2. Эволюция структуры течения при мощности нагревателя 0,41 Вт/м. Интервал времени между соседними кадрами 960 с

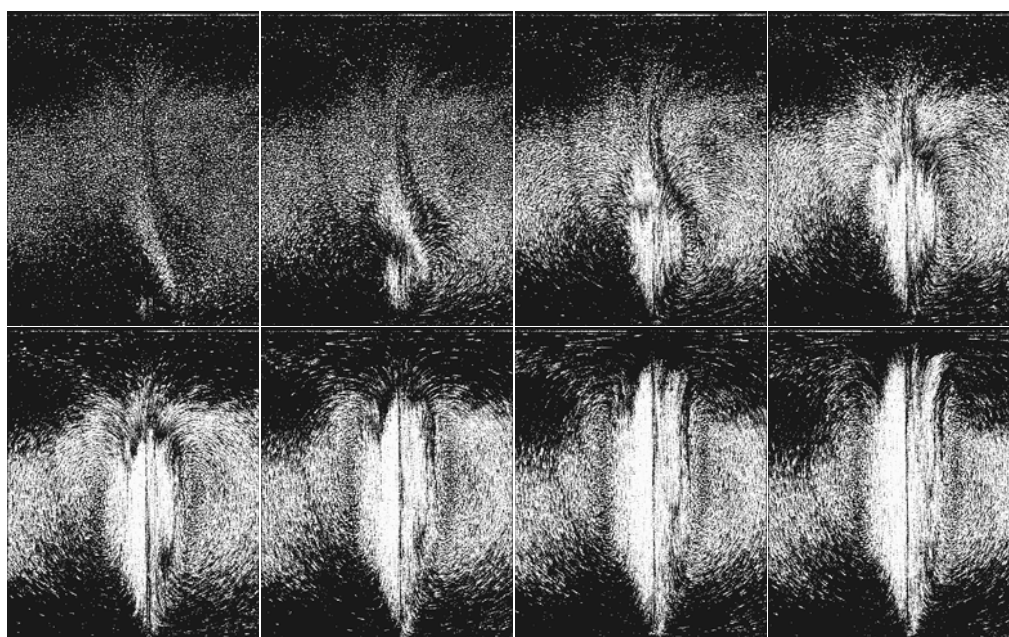


Рис. 3. Эволюция структуры течения при мощности нагревателя 260 Вт/м. Интервал времени между соседними кадрами 8 с

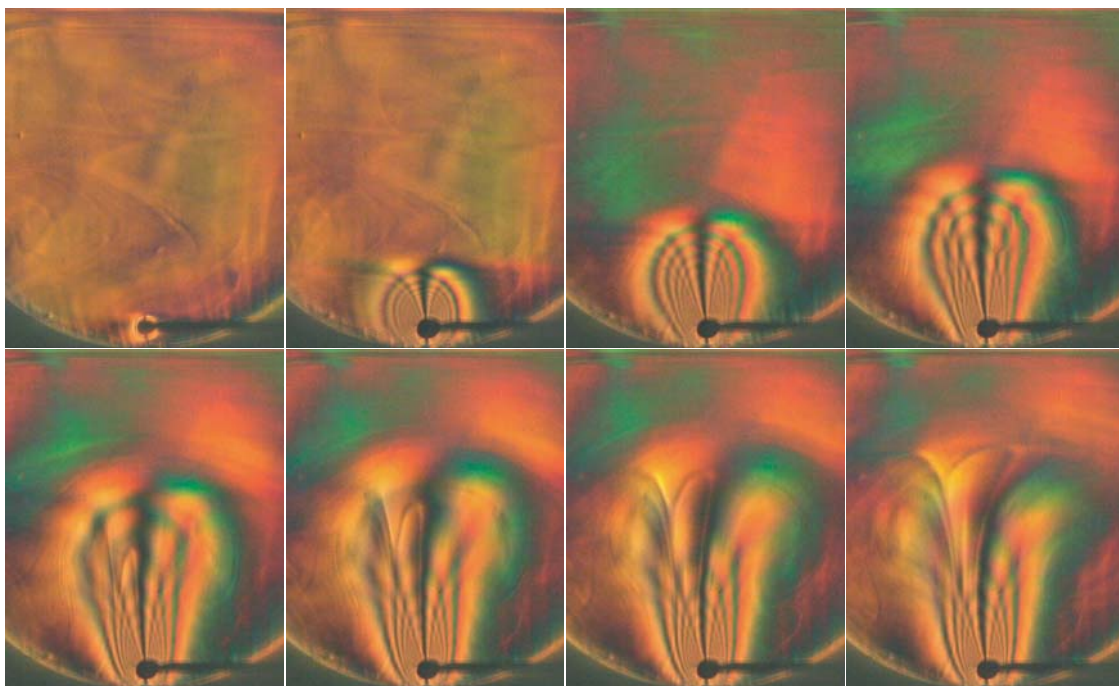


Рис. 4. Эволюция теплового возмущения при мощности нагревателя 0,41 Вт/м. Интервал времени между соседними кадрами 200 с

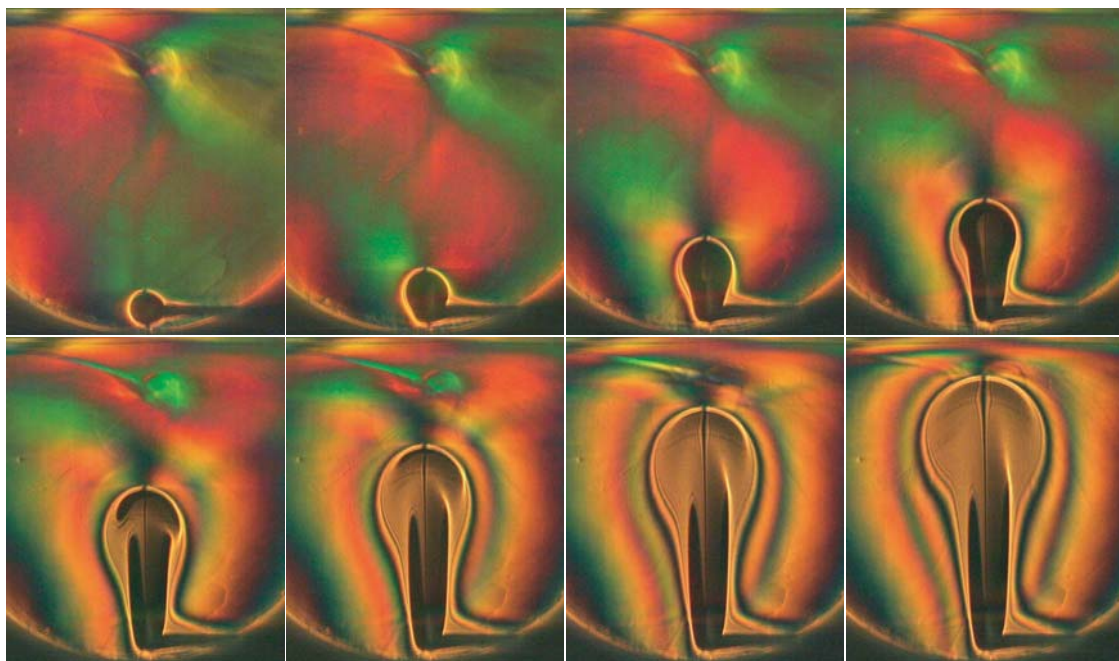


Рис. 5. Эволюция теплового возмущения при мощности нагревателя 28 Вт/м. Интервал времени между соседними кадрами 10 с

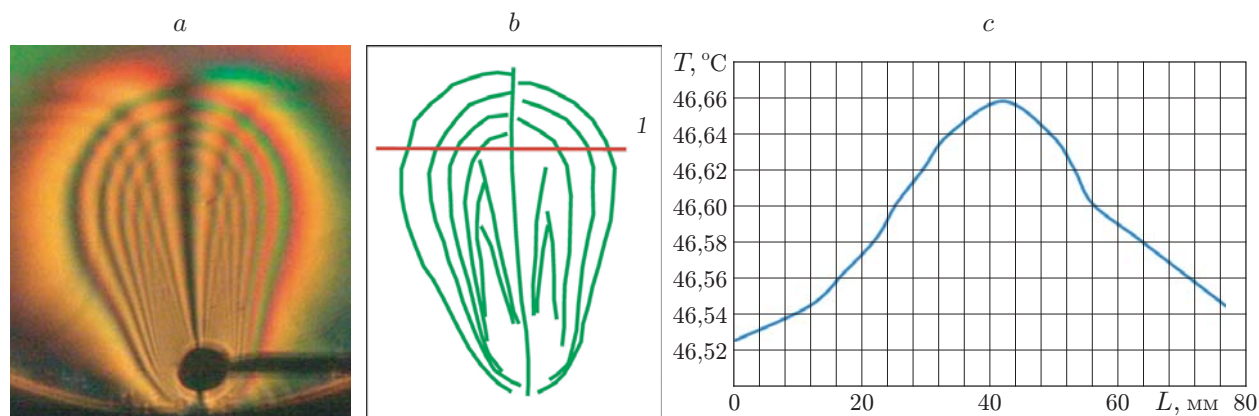


Рис. 6. Пример количественной обработки гильберт-тенеграм: *a* — фрагмент гильберт-тенеграммы (ПЭС-5, режим 1 (см. табл. 2), $t = 5$ мин); *b* — результат скелетизации гильберт-тенеграммы с сечением 1; *c* — распределение температуры в сечении 1 (расстояние от проволоочки 22,3 мм) по гильберт-тенеграмме

$P = 7,1$ 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 рисунке время нормировано на интервал от момента включения нагрева источника до момента выхода головной части струи на поверхность слоя жидкости (см. табл. 2).

Можно провести анализ сценариев развития структуры течения во времени при различных мощностях нагрева и сделать количественные оценки пространственно-временной 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 рис. 2–9. При малых мощностях вначале прогревается ярко выраженный цилиндрический слой жидкости (см. рис. 4, верхний ряд справа), затем медленно формируется локализованный термик, подтягивающий жидкость в восходящий поток только из ближайшей окрестности (см. рис. 2). Когда прогревается достаточно боль-

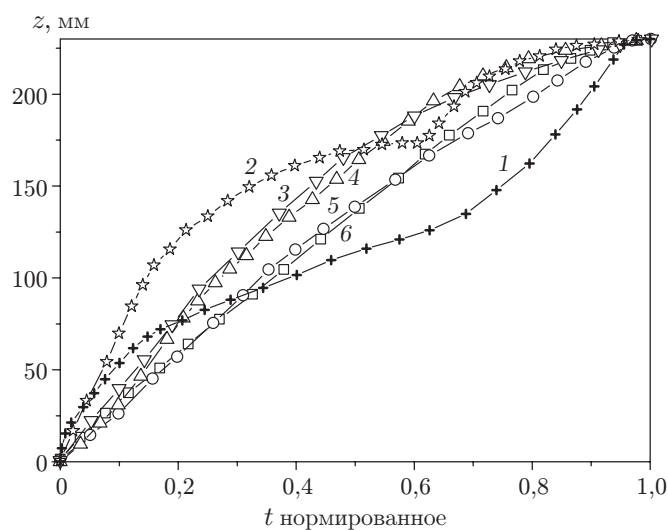


Рис. 7. Зависимости положения переднего фронта плюма от времени и мощности источника тепла: кривая 1 — 0,41; 2 — 1,8; 3 — 7,1; 4 — 28; 5 — 110; 6 — 260 Вт/м

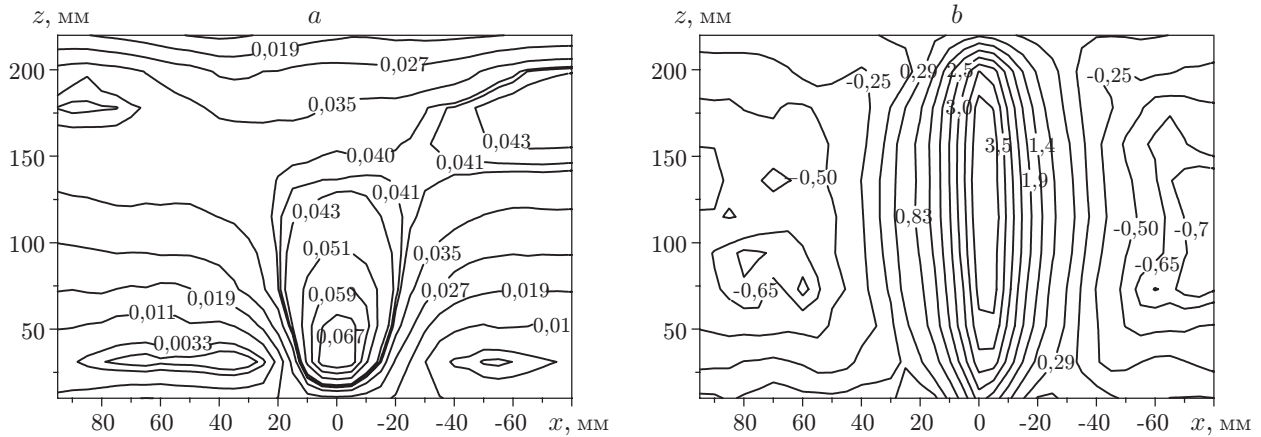


Рис. 8. Изолинии вертикальных компонент скорости (в миллиметрах в секунду): *a* — режим 1, *b* — режим 6

шой объём жидкости, он весь начинает медленно всплывать (см. рис. 2, 4), равномерно вытесняя вышележащий слой жидкости вверх (как поршень). Профили скорости в сечениях над головной частью термика (теплового плюма) плоские (см. рис. 8, *a*). Всплывающий объём жидкости непрерывно подпитывается снизу струйкой подогретой жидкости. Наблюдение показывает, что подводимого тепла недостаточно для формирования интенсивной плавучей струи. За счёт теплоотвода в режиме молекулярной теплопроводности на периферии низкоскоростной струи и от переднего фронта термика в окружающий неподвижный массив теряется необходимый для всплытия запас плавучести. Дальше возникает слабоинтенсивная струя с выходом восходящего потока на свободную поверхность слоя жидкости.

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

Для больших мощностей вертикальная компонента скорости монотонно нарастает,

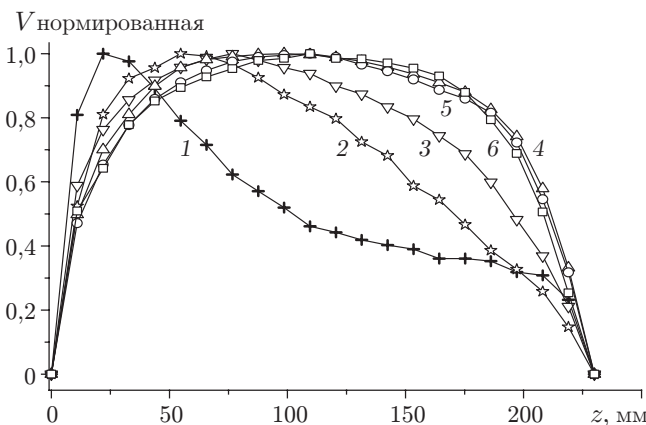


Рис. 9. Зависимости нормированной амплитуды скорости от продольной координаты и от мощности источника тепла (кривая 1 — $P = 0,41$ Вт/м, $V_m = 0,1$ мм/с; 2 — $P = 1,8$ Вт/м, $V_m = 0,28$ мм/с; 3 — $P = 7,1$ Вт/м, $V_m = 0,6$ мм/с; 4 — $P = 28$ Вт/м, $V_m = 1,26$ мм/с; 5 — $P = 110$ Вт/м, $V_m = 2,67$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

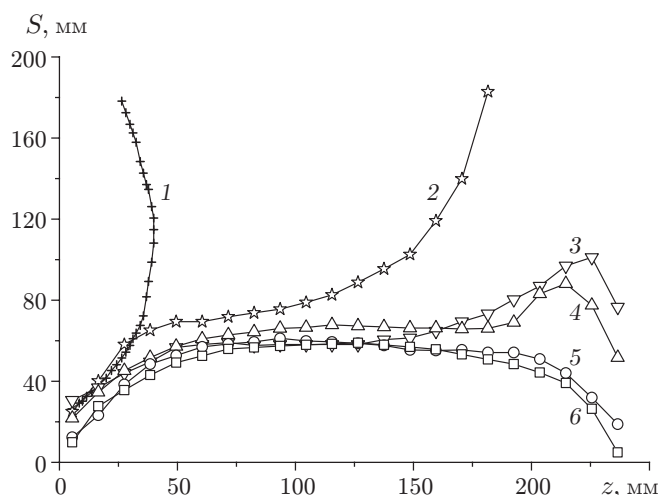


Рис. 10. Зависимости сечения струи от продольной координаты при установившемся течении. Режимы 1–6 (см. табл. 2)

выходит практически на «полочку» и падает вблизи верхней границы (см. рис. 9, кривые 4–6). Для малых мощностей она достигает максимума на некотором расстоянии от дна и затем резко уменьшается (см. рис. 9, кривые 1, 2). При этом струи приобретают большие поперечные сечения (рис. 10, кривые 1, 2) и теряют подъёмную скорость из-за потерь тепла в окружающее пространство вследствие высокого вязкого трения. Таким образом, плюм может просто затухнуть и не иметь выхода на свободную поверхность (см. рис. 8, а и рис. 4). 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.

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 [9]. Количество тепла за промежуток времени от включения нагрева до момента выхода струи на верхнюю границу слоя рассчитывалось исходя из произведения мощности нагревателя на единицу его длины и на соответствующий интервал времени (рис. 11). Видно, что для малых мощностей нагрева эта зависимость имеет сложную форму и переходит в линейную при больших мощностях нагрева.

Для расчётов кинетической энергии обрабатывались видеофильмы движения жидкости в плоскости, перпендикулярной нагревателю. Отснятые кадры разбивались на ячейки размером 32×8 пикселей. Затем вычислялся модуль мгновенного вектора скорости в каждой ячейке. Кинетическая энергия ячеек определялась по классической формуле. Общая кинетическая энергия жидкости в слое единичной толщины (1 мм) находилась путём сложения по всем ячейкам. На рис. 12 видно, что кинетическая энергия примерно линейно зависит от мощности нагрева во всём исследованном диапазоне.

По экспериментальным данным рассчитывается КПД преобразования подведённого тепла в кинетическую энергию. Подобные интегральные характеристики можно получить при обработке результатов численного моделирования течения в условиях, аналогичных экспериментальным.

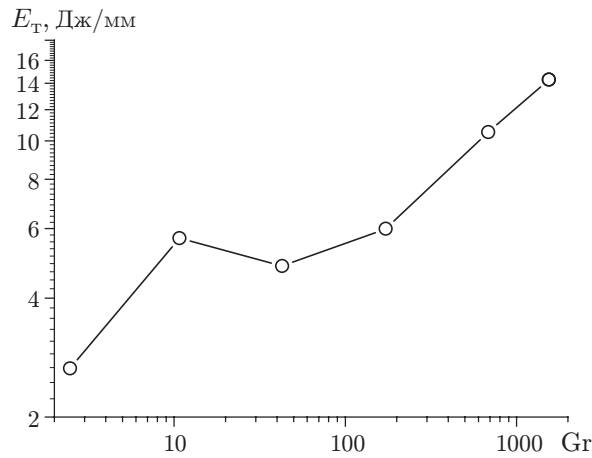


Рис. 11. Тепловая энергия (E_T), поглощённая к моменту выхода струи на поверхность вертикальным слоем жидкости единичной толщины, перпендикулярным нагревателю

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 учётом зависимости вязкости от температуры. Тепло, выделяемое провололкой, моделировалось дельта-функцией в уравнении энергии. Считалось, что стенки полости полностью теплоизолированы, а верхняя свободная граница недеформируема. 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 481×369 узлов.

На рис. 13, *a, b* показаны изолинии функции тока и изотермы в различные моменты времени: верхняя строка — 67,2 с, средняя — 134,4 с, нижняя — 201,6 с. На рис. 14, *a, b* представлено 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

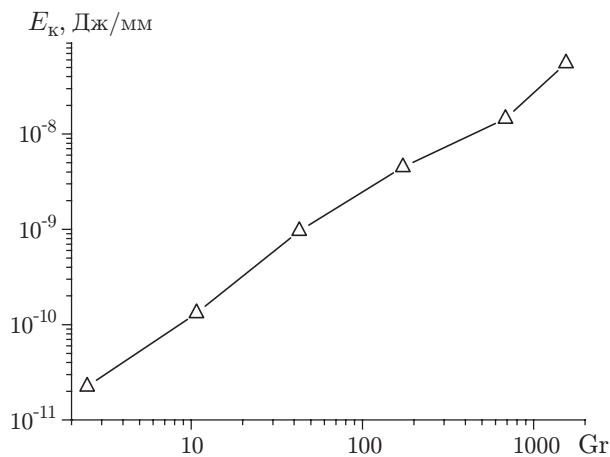


Рис. 12. Кинетическая энергия (E_k), накопленная к моменту выхода струи на поверхность вертикальным слоем жидкости, перпендикулярным нагревателю

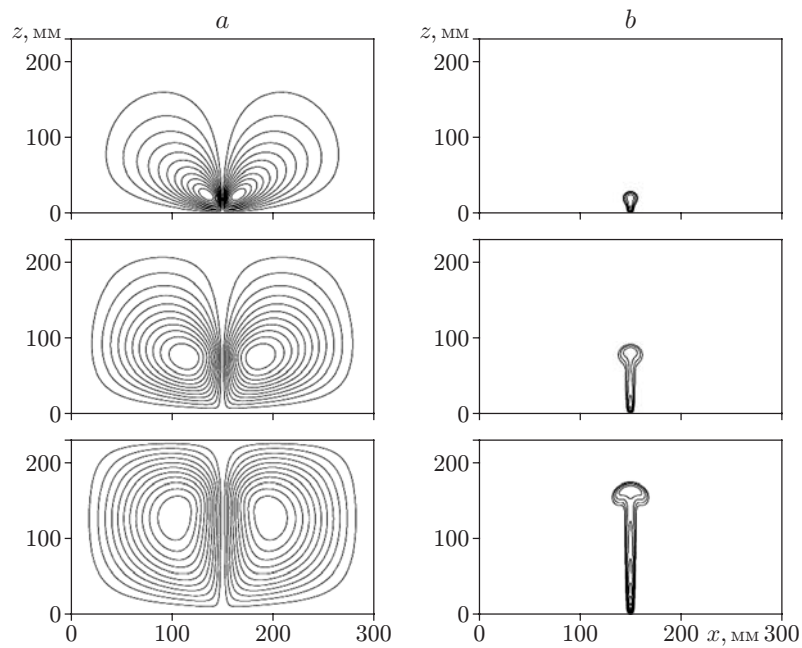


Рис. 13. Зависимость пространственной формы течения и поля температуры от времени в режиме 3: изолинии функции тока (a) и изотермы (b)

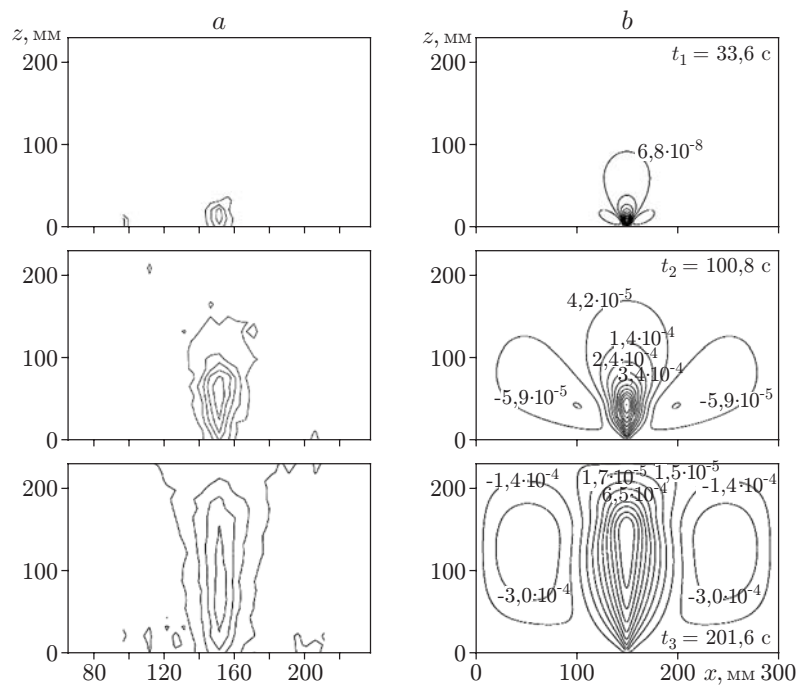


Рис. 14. Изолинии вертикальной составляющей скорости: эксперимент (a) и расчёты (b)

компоненты скорости. Время выхода струи на свободную поверхность жидкости отличается от полученного экспериментально на 10–15 %.

В случае малой мощности источника численные результаты плохо согласуются с экспериментальными как без учёта, так и с учётом зависимости вязкости от температуры. Наиболее вероятное объяснение этому заключается в том, что система уравнений в приближении Буссинеска не описывает низкоскоростные течения сильновязкой жидкости.

Заключение. Результаты физического эксперимента и численного моделирования развития струй термогравитационной природы в сильновязкой жидкости над внезапно включённым линейным источником тепла показывают, что при малых мощностях источника, низких темпах развития струй и низких скоростях течения приближение Буссинеска не выполняется. Учёт влияния зависимости вязкости жидкости от температуры в численном эксперименте приводит к росту амплитуды вертикальной компоненты скорости на оси восходящей струи и незначительной деформации профилей скорости на разных расстояниях от источника. На качественном уровне пространственная форма течения и сценарий развития струи слабо зависят от мощности источника в отличие от наблюдаемых в физическом эксперименте при малых мощностях. Полученные результаты помогут подобрать реологическую модель поведения жидкости при экстремально низкоскоростных течениях вязкой жидкости. 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 термиком на начальном этапе. Сочетание различных методов оптической диагностики позволило получить новые уникальные данные о закономерностях развития плавучих струй.

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. М.: Мир, 1991. Кн. 2. 528 с.
3. Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2001. 409 с.
4. Зоненшайн Л. П., Кузьмин М. И. Внутриплитовый магматизм и его значение для понимания процессов в мантии Земли // Геотектоника. 1983. № 1. С. 28–45.
5. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
6. Арбузов В. А., Дубнищев Ю. Н. Методы гильберт-оптики в измерительных технологиях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 316 с.
7. Дубнищев Ю. Н. Теория и преобразование сигналов в оптических системах. С.-Пб.: Изд-во «Лань», 2011. 368 с.
8. Дубнищев Ю. Н., Дворников Н. А., Нечаев В. Г., Новоселова О. Н. Полихроматическая гильберт-диагностика эволюции вихревых колец, индуцированных скачком давления на отверстии // Автометрия. 2012. 48, № 3. С. 13–21.
9. Голицын Г. С. Исследования конвекции с геофизическими приложениями и аналогиями. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 56 с.

Поступила в редакцию 25 апреля 2012 г.