

УДК 536.25

Развитие нестационарной конвекции в прямоугольной полости при внезапном нагреве вертикальной стенки*

В.С. Бердников^{1,2}, В.А. Гришков¹, Н.А. Шумилов¹

¹Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный технический университет

E-mail: berdnikov@itp.nsc.ru

Экспериментально исследована нестационарная тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в прямоугольной полости при внезапном разогреве одной из вертикальных стенок электрическим током. Исследовано развитие во времени пространственной формы течений этилового спирта с числом Прандтля $Pr = 16$ при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Изучено развитие гидродинамического пограничного слоя на нагреваемой стенке и течения вдоль свободной поверхности слоя жидкости. Измерены профили вертикальной и горизонтальной компонент скорости в процессе развития пограничных слоев и течения в объеме жидкости. С использованием тепловизора исследована эволюция полей температуры на свободной поверхности слоя жидкости.

Ключевые слова: термогравитационная конвекция, термокапиллярный эффект, тонкая вертикальная стенка, свободноконвективный пограничный слой, поля скорости, тепловая волна, физическое моделирование, цифровая видеосъемка, тепловизор.

Введение

Во многих технических и технологических системах содержатся полости, наполненные жидкостями, в которых в режимах нагрева или охлаждения ограждающих стенок развивается нестационарная термогравитационная конвекция [1–12]. При наличии свободной поверхности жидкости в случае неполного заполнения объема полостей при боковом подогреве возникает тепловая гравитационно-капиллярная конвекция [5, 6, 13, 14]. Топливные баки авиационной и ракетной техники — наиболее очевидные примеры таких систем. Тепловое состояние тонкостенных конструкций летательных аппаратов (ЛА) меняется в процессах взлета и посадки. На начальных стадиях выхода на крейсерскую скорость существенно меняются процессы нестационарного сопряженного конвективного теплообмена в топливных баках и в воздушных прослойках фюзеляжа. При полетах на сверхзвуковых скоростях добавляются процессы разогрева обшивки ЛА [1, 2]. Распределения температуры, градиентов температуры и термических напряжений в стенках и массивах, содержащих полости с жидкостями, зависят от нестационарного сопряженного конвективного теплообмена. В неравномерно нагретых объемах жидкости, находящихся в поле тяжести, развиваются свободно-конвективные течения, сопровождающиеся

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-0707.

расслоением жидкости по температуре по высоте слоя [1–12]. При подводе тепла к стенкам нагретая жидкость всплывает и накапливается сверху. Это также влияет на поля температуры в стенках. Формирование устойчиво стратифицированного ядра оказывает обратное влияние на развитие пограничных слоев. Существенное влияние на закономерности сопряженного теплообмена оказывает пространственная форма конвективных течений. В свою очередь форма конвективных течений в значительной мере зависит от конфигурации полости и расположения разогретых и охлажденных стенок и их фрагментов, а также от их теплофизических свойств [1–12]. Для адекватных оценок полей термических напряжений в конструкциях необходимо знать локальные особенности гидродинамики и порождаемые ими особенности локального сопряженного теплообмена и как следствие закономерности зависимостей полей температуры от времени в тонких стенках [1, 2]. При наличии неизотермической границы раздела жидкость-газ в зоне контакта со стенкой за счет термокапиллярного эффекта возникает остронаправленный поток нагретой жидкости на холодную стенку [13, 14]. В результате возникают большие локальные градиенты температуры и термические напряжения. Эти процессы до настоящего времени плохо исследованы. В работах [2, 9–12] наличие зоны контакта жидкость-газ-стенка обсуждалось, но задачи сопряженного теплообмена в полной постановке не решались. Экспериментальные исследования развития нестационарных тепловых гравитационно-капиллярных течений в режимах натекания на стенки и зависимости температуры стенок от времени практически отсутствуют [13, 14]. В подавляющем большинстве предшествующих работ исследования проводились в бесконечно длинных слоях текучих сред [5, 6] при стационарных граничных условиях, или внимание обращалось на влияние тепловой инерции стенки на начальном этапе развития конвективного течения [4, 9, 10].

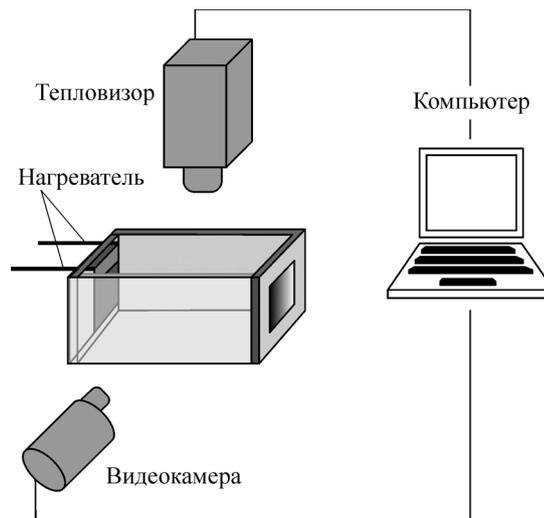
Представленная работа является развитием проведенных в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН серии работ, направленных на изучение влияния сопряженного свободноконвективного теплообмена на распределения температуры в тонких стенках в режимах нестационарного теплового гравитационно-капиллярного течения [13, 14]. В работе [14] были начаты исследования зависимости распределений температуры в тонкой вертикальной перегородке при натекании на нее потока горячей жидкости от противоположной нагреваемой вертикальной стенки. В настоящей работе использована более совершенная видеотехника и современный тепловизор, что позволяет с лучшей пространственно-временной разрешающей способностью исследовать гидродинамику и измерять параметры нестационарных полей температуры на поверхностях. Авторами представлены результаты первого этапа исследований. Изучался процесс развития нестационарного пограничного слоя на внезапно нагреваемой электрическим током вертикальной стенке, выход нагретого потока на свободную поверхность слоя жидкости и развитие потока вдоль поверхности до противоположной тонкой стенки. На следующем этапе будет подробно исследоваться процесс взаимодействия горячего потока с тонкой вертикальной стенкой и эволюция во времени полей температуры.

Методика эксперимента

Схема рабочего участка экспериментального стенда показана на рис. 1. Прямоугольная полость из оргстекла имеет прозрачные боковые стенки, позволяющие наблюдать и вести цифровую видеосъемку течения жидкости в высвеченной плоским световым ножом области. На одном торце полости расположена нагреваемая электрическим током вертикальная стенка (нагревается полоса из тонкой нержавеющей стали). Размеры нагреваемой стенки — 220×93 мм. Сопротивление нагревателя составляет 0,014 Ом. При силе тока 30 А плотность теплового потока $q = 615,84 \text{ Вт/м}^2$. Разогреваемая переменным

Рис. 1. Схема рабочего участка установки.

электрическим током плоская металлическая пластинка укреплена на пластиковом постаменте. Мощность нагрева регулировалась с помощью лабораторного автотрансформатора. Подключение схемы к сети происходило через трансформатор. Протекающий через пластину ток измерялся с помощью индукционного амперметра. Длина слоя жидкости составляла 265 мм, ширина полости — 95 мм, высота слоя жидкости — 160÷165 мм. Вертикальная стенка, расположенная



на противоположном торце полости, изготовлена из жаропрочной стали 1X13 толщиной 0,6 мм. Внешняя сторона этой стенки зачернена, что позволяет измерять тепловизором нестационарное поле температуры в режиме натекания потока горячей жидкости. В работе использовался тепловизор FLIR X6530sc компании FLIR Systems с оптическим сенсором на базе матрицы 640×512, основанной на детекторе из теллурида кадмия-ртути. Данная система обеспечивает регистрацию инфракрасного излучения в диапазоне от 1,5 до 5,1 мкм. Тепловизор FLIR X6530sc оснащен интерфейсами Gigabit Ethernet и Cameralink для обеспечения возможности сообщения с персональным компьютером. При подключении к компьютеру он управляется с помощью программы FLIR ResearchIR. Максимальная частота кадров в режиме полного кадра составляет до 145 Гц и до 3650 Гц при размере изображения (размере кадра) 132×8 пикс. Чувствительность 18 мК позволяет получать изображения, характеризующиеся большой точностью измерения локальной температуры.

Видеосъемка течений прозрачной жидкости с разрешением 1920×1080 точек проводилась с использованием апробированной методики визуализации плоскими частицами-трассерами размерами 10–15 мкм и с подсветкой через щелевую диафрагму в нужном сечении. Примеры мгновенной формы течения в торцевой части полости вблизи нагреваемой левой стенки при $I = 30$ А и $q = 615,84$ Вт/м² показаны на рис. 2.

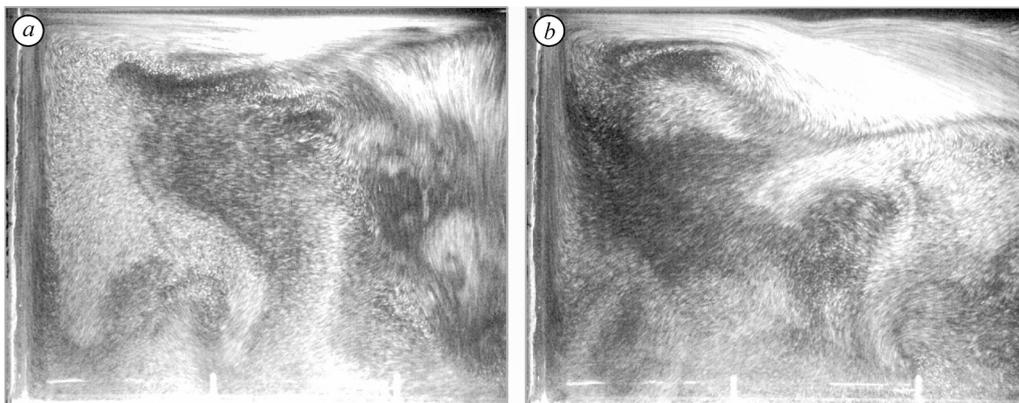


Рис. 2. Формы течения в два момента времени после включения нагрева стенки — 17 (a) и 31 (b) с.

После короткого инкубационного периода нагрева прилегающего к стенке слоя жидкости возникает подъемный поток в пристеночной области. Течение быстро приобретает нестационарную пространственную форму, и развитие пограничных слоев у нагреваемой стенки происходит при существенном влиянии флуктуаций скорости во внешней части. Эволюция течения во времени в пристеночной области показана на рис. 3. На развитие течения во всей области сильное влияние оказывает термокапиллярный эффект. После включения нагрева стенки вдоль свободной поверхности возникает продольный градиент температуры и развивается термокапиллярный поток в направлении противоположной холодной стенки. Вдоль свободной поверхности проходит фронт нагретой жидкости. Под свободной поверхностью с небольшой задержкой развивается обратный поток.

На рис. 4 показаны профили вертикальной компоненты скорости на уровне 85 мм от дна полости в те же моменты времени, что и качественные формы течения, приведенные на рис. 3. Вначале амплитуда скорости быстро нарастает (рис. 5, кривая 1). Затем, по мере накопления нагретой жидкости в верхней части слоя, амплитуда восходящего потока снижается до уровня установления постоянного перепада температуры между вертикальными стенками и установившейся стратификации ядра слоя жидкости. Температура нагреваемой стенки монотонно нарастает с выходом на установившееся значение (рис. 5, кривая 2).

Эволюция поля температуры на свободной поверхности жидкости после включения нагрева стенки представлена на рис. 6, начиная с исходного состояния при $t = 0$ с. На открытой свободной поверхности жидкости за счет испарения этилового спирта и конвективного теплообмена до начала нагрева левой стенки полости наблюдается типичная слабоинтенсивная рэлей-бенаровская конвекция. В центре возникает опускной

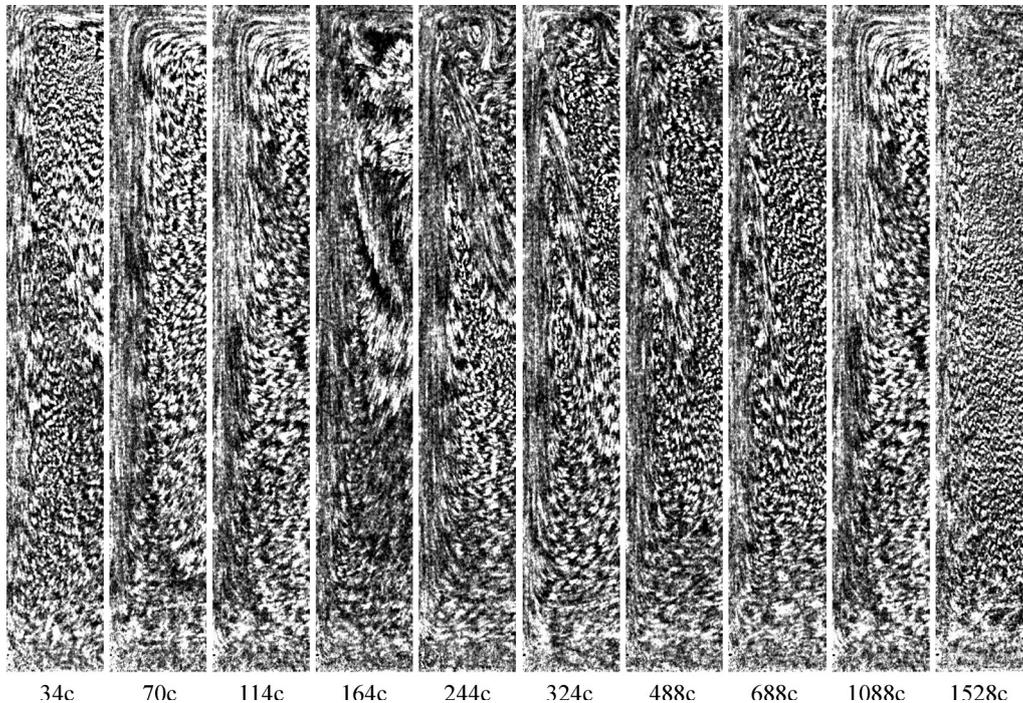


Рис. 3. Эволюция пристеночного течения во времени после включения нагрева стенки.

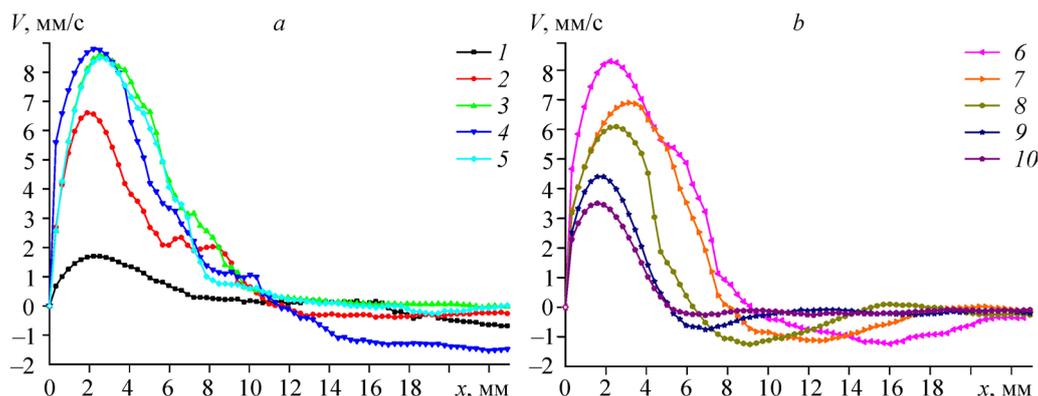


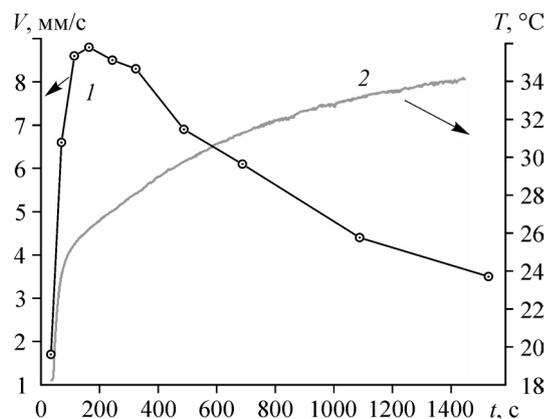
Рис. 4. Эволюция профилей вертикальной компоненты скорости во времени после включения разогрева вертикальной стенки.

$t = 34$ с (1), 70 с (2), 114 с (3), 164 с (4), 244 с (5), 324 с (6), 488 с (7), 688 с (8), 1088 с (9), 1528 с (10).

поток охлажденной жидкости (темная продольная полоса на кадре тепловизионного фильма в момент $t = 0$ с на рис. 6).

После включения нагрева левой стенки вдоль свободной поверхности распространяется фронт нагретой жидкости. При данной мощности нагрева фронт нагретой жидкости достигает холодной стенки через 60 секунд. Компьютерная обработка тепловизионных фильмов позволила определить положения фронта тепловой волны и скорость ее распространения вдоль свободной поверхности (рис. 7), построить поля изотерм на этой поверхности (рис. 8) и распределения температуры вдоль нее (рис. 9) в различные моменты времени. По профилям температуры можно определить локальные градиенты температуры и оценить вклад термокапиллярного эффекта в генерацию течения вдоль свободной неизотермической поверхности жидкости. То, что течение имеет тепловую гравитационно-капиллярную природу, показывают профили горизонтальной компоненты скорости на рис. 10. Профиль скорости в момент времени $t = 0$ с в приповерхностной области имеет типичный для термокапиллярного течения вид, для него характерна максимальная скорость на свободной поверхности и существенный градиент скорости по нормали к свободной поверхности. На рис. 10 показаны мгновенные распределения горизонтальной компоненты скорости. Они отражают турбулентный характер течения в объеме жидкости и тот факт, что по мере формирования устойчиво стратифицированного ядра интенсивность течения падает и приобретает установившийся регулярный характер. Кроме глобальной циркуляции жидкости по контуру полости устанавливается иерархия вытянутых по горизонтали ячеек с направлением течения от горячей стенки к холодной в верхней ветви течения и в обратном направлении в нижней ветви течения.

Рис. 5. Зависимости от времени амплитуды скорости (1) и температуры стенки (2) при $I = 30$ А, $q = 615,84$ Вт/м².



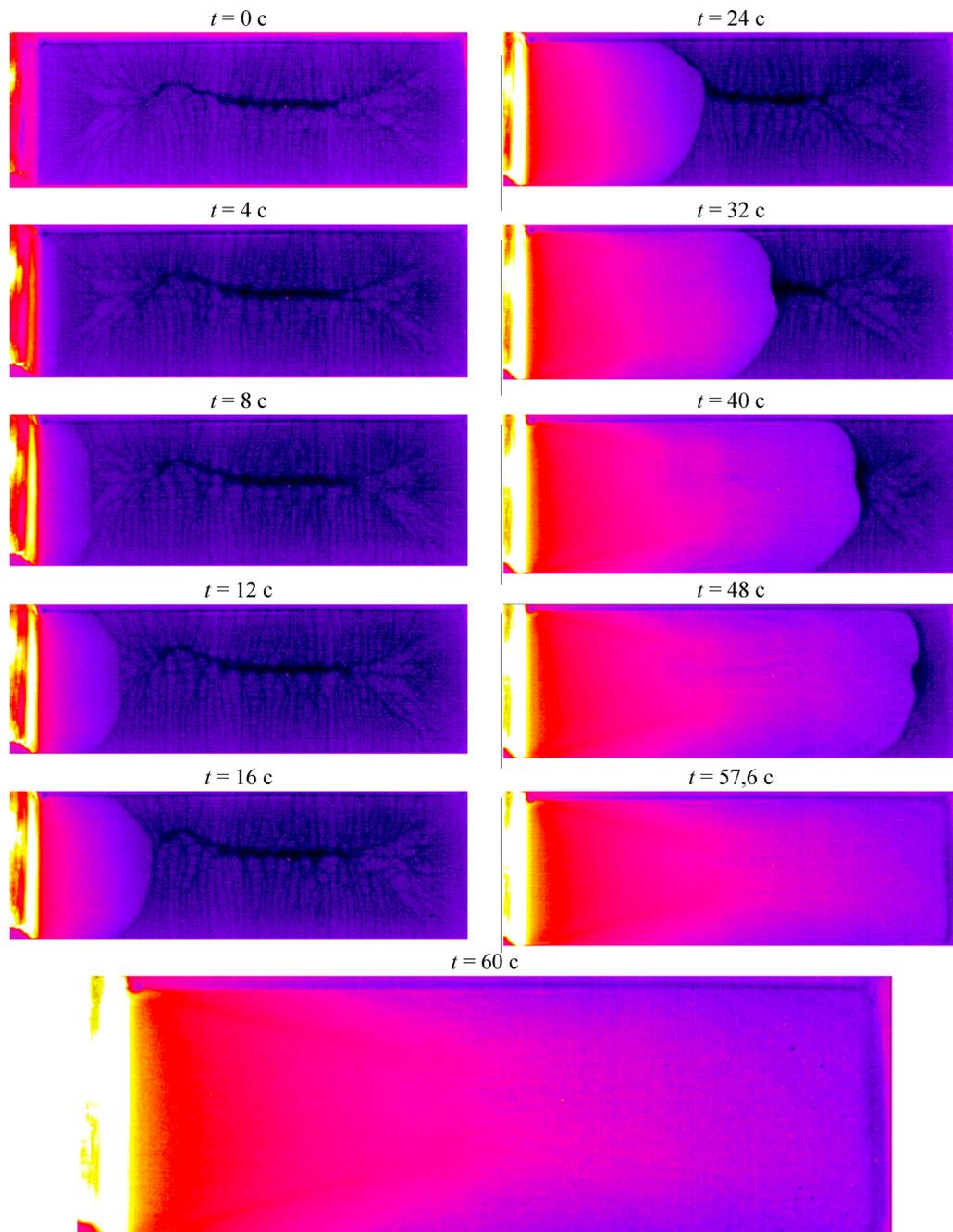


Рис. 6. Эволюция поля температуры во времени на свободной поверхности слоя жидкости после включения нагрева вертикальной стенки при $I = 30$ А, $q = 615,8358$ Вт/м².

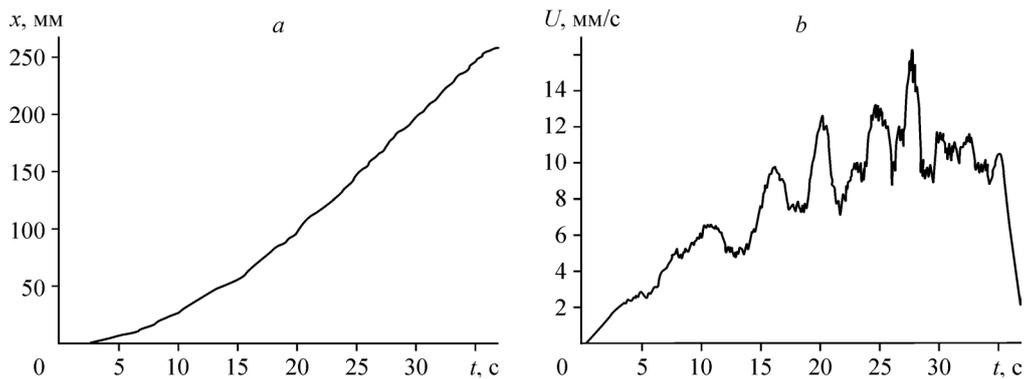


Рис. 7. Положения фронта тепловой волны в различные моменты времени (а) и локальная скорость распространения фронта тепловой волны (б).

Эволюция течения в пристеночной области (рис. 3) зависит от гидродинамических процессов в объеме жидкости. После включения нагрева стенки и до $t = 34$ с течение во всем объеме обусловлено теплоотдачей со свободной поверхности. Общая форма течения в центральном сечении по ширине полости, расположенного по центру темной полосы на рис. 6 в момент $t = 0$ с, показана на рис. 2 в момент $t = 17$ с. За этот промежуток времени ($t = 0-17$ с) кардинально форма течения не изменилась, несмотря на то, что в восходящем вдоль нагреваемой стенки исходном слабом течении уже начинает формироваться восходящий поток за счет подогрева. В момент $t = 34$ с генерируемый подогревом восходящий поток выходит на свободную поверхность (профиль скорости l на рис. 4). После выхода нагретой жидкости на свободную поверхность резко возрастает скорость течения вдоль нее. В момент $t = 70$ с поток нагретой жидкости достигает половины расстояния между торцевыми стенками ($x = 180$ мм). Видно, что амплитуда скорости резко возросла (рис. 4, кривая 2). В момент времени $t = 114$ с сгусток нагретой жидкости в возвратном течении под свободной поверхностью, отраженный от правой холодной стенки, достигает отметки $x = 180$ мм. В промежуток времени $t = 34-114$ с под действием сил плавучести и термокапиллярного эффекта в левом углу вблизи нагретой стенки формируется интенсивный вихрь с вращением, совпадающим по направлению с основным

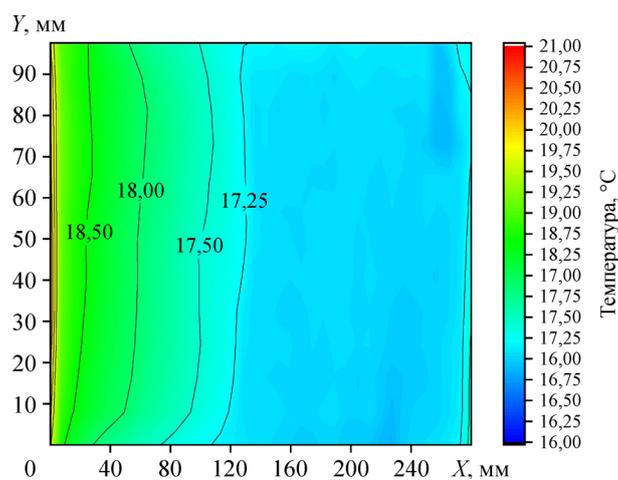


Рис. 8. Поле изотерм на свободной поверхности жидкости.

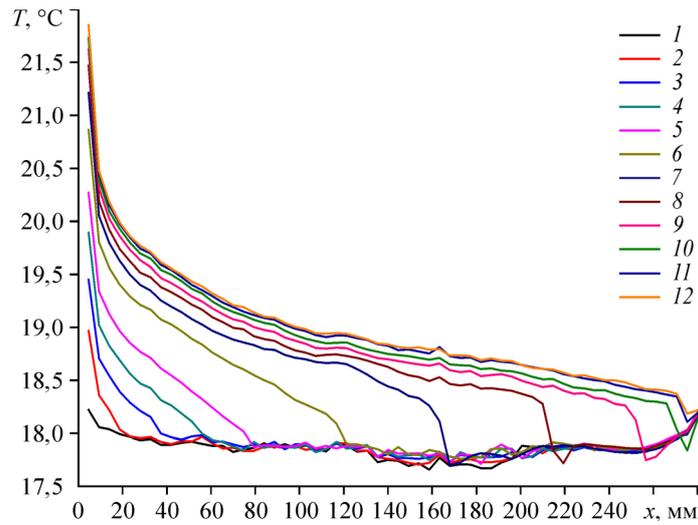


Рис. 9. Распределения температуры вдоль свободной поверхности в центральном сечении в различные моменты времени.

$t = 0$ с (1), 4 с (2), 8 с (3), 12 с (4), 16 с (5), 24 с (6), 32 с (7), 40 с (8), 48 с (9), 52 с (10), 57,6 с (11), 60 с (12); усреднение в 10 раз.

глобальным течением. К моменту времени $t = 164$ с кроме углового вихря под свободной поверхностью сформировался приповерхностный поток от нагретой стенки до холодной и нижняя ветвь от холодной стенки к горячей. Природа этого течения объясняется избыточной плавучестью жидкости в приповерхностном слое сверху. Одновременно в промежутке времени $114 \text{ с} \leq t \leq 164 \text{ с}$ во внешней части пограничного слоя на вертикальной горячей стенке формируется опускной поток, длина которого со временем растет (рис. 3).

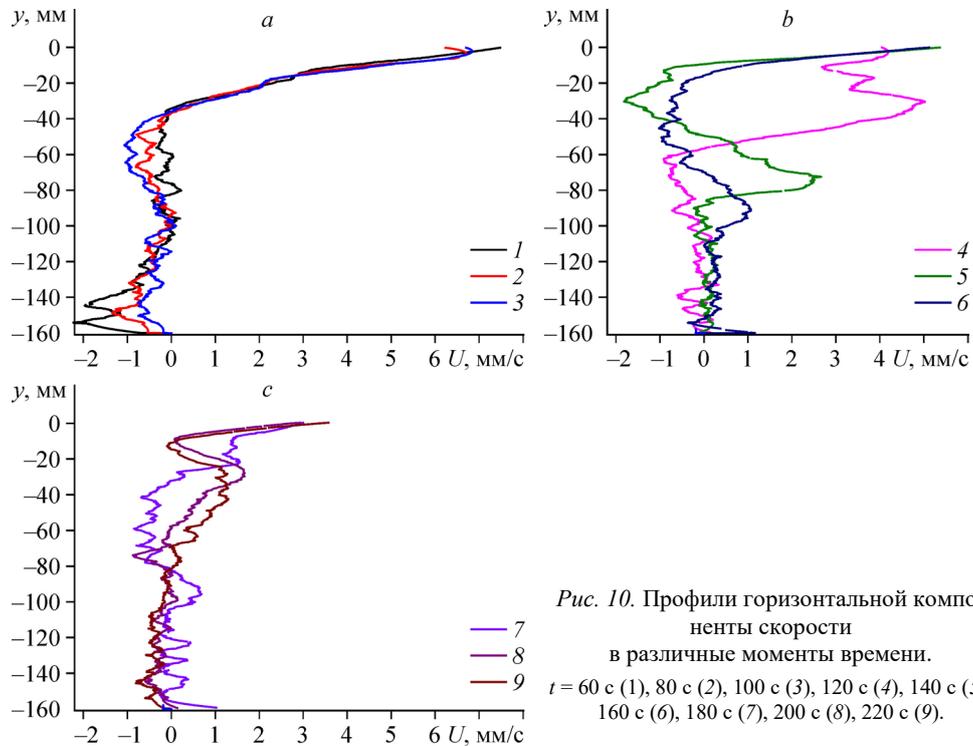


Рис. 10. Профили горизонтальной компоненты скорости в различные моменты времени.
 $t = 60$ с (1), 80 с (2), 100 с (3), 120 с (4), 140 с (5), 160 с (6), 180 с (7), 200 с (8), 220 с (9).

В результате возникает ситуация, аналогичная конвективному течению в узких вертикальных слоях со стенками, нагретыми до разных температур, в которых проявляется неустойчивость на границе встречных потоков в виде валов с циркуляцией по часовой стрелке (как в рассматриваемом случае). Картина этих вторичных вихрей не является стационарной. Вихри дрейфуют вниз и исчезают, а затем возникают в верхней части (рис. 3, картина здесь не очень четкая, потому что для получения треков сложены 50 кадров видеофильма). Этот процесс наблюдается до момента времени $t = 1528$ с.

Заключение

Экспериментально исследовано развитие конвективного течения в слое этилового спирта со свободной поверхностью после внезапного нагрева одной из вертикальных стенок прямоугольной полости. С использованием цифровой видеосъемки и компьютерной обработки видеофильмов изучено развитие течения во всей полости и эволюция во времени нестационарного гидродинамического пограничного слоя на нагреваемой вертикальной стенке. Рассмотрено развитие течения вдоль свободной поверхности слоя жидкости и с использованием тепловизора исследована эволюция во времени температуры на свободной поверхности, при этом поток нагретой жидкости натекает на тонкую металлическую вертикальную стенку. Особенности развития пространственной формы течения и нестационарного сопряженного конвективного теплообмена натекающего потока со стенкой существенно влияют на нестационарные поля температуры и ее градиентов в тонкой металлической стенке. Максимальные градиенты температуры в стенке возникают после удара набегающего потока и на начальной стадии развития течения у холодной стенки.

Список литературы

1. Белов В.К., Белов В.В. Прочность и устойчивость ракетных и авиационных конструкций при термическом нагружении. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 491 с.
2. Забродин В.С. Температурные поля в конструкции летательных аппаратов (Методы расчета). М.: Машиностроение, 1978. 184 с.
3. Гебхарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р., Саммакия Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. В 2-х книгах, кн. 1. Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 678 с.
4. Моллендорф Д.К., Гебхарт Б. Экспериментальное исследование интенсивной неустойчивой естественной конвекции // Теплопередача. 1970. № 4. С. 55–61.
5. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
6. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Непомнящий А.А. Устойчивость конвективных течений. М.: Наука, 1989. 320 с.
7. Полежаев В.И. Нестационарная ламинарная тепловая конвекция в замкнутой области при заданном потоке тепла // Изв. АН СССР. МЖГ. 1970. № 4. С. 109–117.
8. Андерсон Р., Бежан А. Свободная конвекция на боковых поверхностях вертикальной стенки, разделяющей жидкости с разными температурами // Теплопередача. 1980. Т. 102, № 4. С. 49–55.
9. Полежаев В.И. Конвективное взаимодействие в цилиндрическом сосуде, частично заполненном жидкостью, при подводе тепла к боковой и свободной поверхностям и дну // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 4. С. 77–88.
10. Черкасов С.Г. Естественная конвекция в вертикальном цилиндрическом сосуде при подводе тепла к боковой и свободной поверхности // Изв. АН СССР. МЖГ. 1984. № 6. С. 51–56.
11. Черкасов С.Г. Квазистационарный режим естественной конвекции в вертикальном цилиндрическом сосуде // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 1. С. 146–152.
12. Монсева Л.А., Черкасов С.Г. Теоретические исследования влияния теплопроводности стенки на процессы свободноконвективного теплообмена в вертикальной цилиндрической емкости // Теплофизика высоких температур. 2002. Т. 40, № 3. С. 485–493.

13. **Бердников В.С., Гришков В.А.** Структура течения и теплообмен в вертикальных слоях жидкости в режимах термогравитационной и тепловой гравитационно-капиллярной конвекции // Сб. тр. Всеросс. конференции по аэродинамике летательных аппаратов и прочности авиационных конструкций. СибНИА, 17–19 июня 2008, Новосибирск. 2009. С. 124–131.
14. **Бердников В.С., Гапонов В.А., Гришков В.А., Лиханский П.М., Марков В.А.** Влияние нестационарной тепловой гравитационно-капиллярной конвекции на распределение температуры в тонкой вертикальной стенке // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 2. С. 197–208.

*Статья поступила в редакцию 17 июля 2019 г.,
после доработки — 3 октября 2019 г.,
принята к публикации 6 ноября 2019 г.*