

УДК 536.25

**Влияние нестационарной тепловой гравитационно-капиллярной конвекции на распределение температуры в тонкой вертикальной стенке\***

**В.С. Бердников<sup>1</sup>, В.А. Гапонов<sup>1</sup>, В.А. Гришков<sup>1</sup>, П.М. Лиханский<sup>2</sup>, В.А. Марков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Сибирский научно-исследовательский институт авиации (СибНИА) им. С.А. Чаплыгина, Новосибирск*

E-mail: berdnikov@itp.nsc.ru

Экспериментально исследованы зависимости распределений температуры в тонкой металлической стенке от времени в двух режимах конвективного теплообмена в модели бака. В первом случае вертикальная рабочая стенка разогревалась изнутри за счет конвективного потока тепла от монотонно разогреваемой противоположной стенки и охлаждалась за счет теплоотдачи в окружающую среду. Используя тепловизор и термодатчики, прослежена зависимость поля температуры на тонкой стенке от стадии развития конвективного течения. Во втором режиме стенка бака однородно разогревалась инфракрасным излучением с внешней стороны, а на внутренней стороне возникало нестационарное конвективное течение и разогрев жидкости в объеме. Изучена зависимость распределений температуры по высоте стенки от времени. Показано, что на структуру течения и на конвективный теплообмен в слое топлива со свободной границей кроме сил плавучести влияет термокапиллярный эффект. От локальных особенностей течения зависит распределение температуры в тонкой стенке.

**Ключевые слова:** тепловая гравитационно-капиллярная конвекция, силы плавучести, термокапиллярный эффект, гидродинамика, нестационарные поля температуры в тонкой сетке, тепловизор.

**ВВЕДЕНИЕ**

Развитие разноскоростной авиационной техники выдвигает повышенные требования к качеству расчетов термических напряжений в элементах конструкций летательных аппаратов (ЛА). Значительные термические напряжения возникают в неизотермических тонкостенных элементах конструкций ЛА. Примерами таких элементов служат топливные баки, заполненные полностью или частично [1, 2]. В неизотермических условиях распределения температуры на стенках баков и в элементах конструкций, контактирующих с баками, зависят от локальных особенностей сопряженного конвективного теплообмена. Для оценок и точного расчета термических напряжений и анализа общего напряженно-дефор-

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-08-01245а).

мированного состояния ЛА необходимы достоверные знания о конвективном и сложном сопряженном теплообмене в конструкции ЛА в режимах взлета, выхода на крейсерскую дозвуковую или сверхзвуковую скорость и посадки, т. е. в нестационарных условиях для температуры на внешних и внутренних поверхностях конструкции. Результатом нестационарного сложного теплообмена, закономерности которого зависят от скорости подъема ЛА на заданную высоту, от высоты (от температуры на заданной высоте) и скорости полета, являются распределения температуры в составных областях „стенки бака–топливо–газ“.

Неравномерное распределение температуры в тонких стенках баков обусловлено следующими причинами. Во-первых, в неравномерно нагретых объемах жидкости, находящихся в поле тяжести, развитие термогравитационной конвекции сопровождается расслоением жидкости по температуре в объеме полости любой конфигурации и при любом расположении нагреваемых и охлаждаемых стенок или их фрагментов [3–9]. При подводе тепла к стенкам бака нагретая жидкость всплывает и накапливается сверху. В нестационарных условиях неравномерность распределения температуры и плотности по высоте слоя жидкости может быть более выраженной из-за эффекта максимума температурного расслоения [4, 7, 8, 10–12]. Эту особенность стратификации жидкости по плотности в объеме или в его ядре будет отслеживать распределение температуры по вертикали в тонких стенках. Но влияние эффекта устойчивой стратификации маскируется наложением процессов формирования пограничных слоев на стенках [3–9] и перераспределением температуры в пристеночной области. Как следствие, меняются закономерности локальной теплоотдачи. Во-вторых, в частично заполненных баках будет существенно проявляться наличие границы раздела „жидкость–газ“ и влияние особенностей структуры течения у верхней свободной границы жидкости, обусловленное ее неизотермичностью и влиянием термокапиллярного эффекта. Наличие свободной границы топлива приводит в неизотермических условиях к развитию тепловой гравитационно-капиллярной конвекции со сложной пространственной структурой [7–9], которая может повлиять на локальные процессы теплоотдачи и, соответственно, на распределение температуры в стенке вблизи границы раздела „жидкость–газ“. Этот эффект дополняет отмеченное в [1] локальное изменение температуры тонкой стенки из-за существенной разницы коэффициентов теплопроводности топлива и газа.

Настоящая работа является продолжением экспериментальных исследований эволюции структуры течения и теплообмена во времени в слоях жидкости различной ориентации в режимах одновременного разогрева (или охлаждения) границ слоя [12] и серии работ по исследованию ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) в свободноконвективных пограничных слоях на вертикальных стенках слоев жидкости [5, 6] при стационарных граничных условиях. В работе [12] получены качественные данные по структуре течения и количественные данные о коэффициентах теплоотдачи в нестационарных режимах термогравитационной конвекции в слоях этилового спирта и воздуха. В работах [5, 6] получены качественные и количественные данные о структуре течения в слоях в целом и в пограничных слоях на вертикальных стенках, о коэффициентах теплоотдачи в различных нестационарных режимах течения в слоях этилового спирта, в условиях ЛТП и в турбулентных пограничных слоях.

Для понимания относительной роли сил плавучести и термокапиллярного эффекта в слоях со свободной границей жидкости и с продольным градиентом температуры было проведено численное моделирование установившихся режимов конвекции термогравитационной, термокапиллярной и гравитационно-капиллярной природы [9, 13]. Результаты, полученные методом компактных разностей с высоким пространственным разрешением при стационарных граничных условиях первого рода, позволяют понять корреляции между особенностями структуры

течения и процессами локального теплообмена. Они полезны при качественном анализе причин возникновения градиентов температуры в тонких стенках в режимах сопряженного теплообмена.

#### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для экспериментальной проверки влияния структуры нестационарной конвекции на распределения температуры в тонкой металлической стенке в режимах возникновения и развития конвективного течения была изготовлена простая экспериментальная установка. Основная деталь рабочего участка — тонкая вертикальная стенка из жаропрочной стали 1X13 (ЭЖ1) толщиной 0,58 мм. Рабочая стенка контактировала со слоем имитатора топлива — этиловым спиртом, которым заполнена прямоугольная полость. Проведены две серии экспериментов с различными режимами нагрева тонкой стенки. В этих экспериментах модель бака одна и та же. Менялась только компоновка рабочего участка. Модель изготовлена из прозрачного оргстекла толщиной 10 мм. Внутренние размеры полости: длина — 280 мм, высота — 180 мм, ширина — 95 мм. В первой серии моделировалось изменение температурного режима тонкой стенки, когда она играет роль приемника тепла от разогреваемой противоположной торцевой стенки полости. В этом случае рабочая стенка разогревалась изнутри за счет нестационарного конвективного потока тепла от монотонно разогреваемой противоположной стенки и охлаждалась за счет теплоотдачи в окружающую среду. Схема рабочего участка в первой серии экспериментов показана на рис. 1. Рабочая торцевая стенка на рис. 1 справа. Внутри бака у противоположной торцевой стенки размещен вертикальный плоский теплообменник в виде разогреваемой постоянным электрическим током металлической фольги из нержавеющей стали. Прозрачные боковые стенки, дно и крышка позволяли наблюдать и вести видеосъемку структуры нестационарной конвекции с использованием традиционной для ИТ СО РАН методики визуализации [6, 7] и подсветки плоскими световыми ножами. Сверху бака устанавливается непрозрачный кожух для крепления двух полупроводниковых лазеров, которые создают плоский узкий световой луч (световой “нож”), рассекающий слой жидкости в вертикальной плоскости, параллельной прозрачной боковой стенке. Течение жидкости, визуализированное добавкой практически монодисперсной фракции частиц-чешуек с размерами 10...15 мкм, снимается цифровой видеокамерой в высвеченной световым ножом области. Основным гидродинамическим объектом исследований был пограничный слой, развивающийся на тонкой

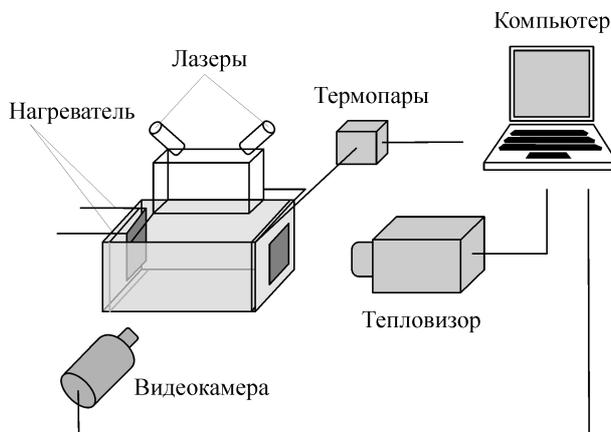


Рис. 1. Схема рабочего участка установки 1.

вертикальной металлической стенке. Но для анализа процессов его формирования и эволюции во времени велась видеосъемка развития пространственных форм течения во всем объеме жидкости. Используя тепловизор, измерялось поле температуры на стальной стенке с внешней стороны. Применялся тепловизор “ИНФРАТЕРМ”, разработанный и изготовленный в Институте физики полупроводников СО РАН. С внутренней стороны стенки и в объеме бака температура измерялась нихром-константановыми термопарами. Опрос термопар проводился контроллером. Вся информация с видеокамеры, тепловизора и контроллера записывалась и обрабатывалась с помощью компьютера. Прослежена зависимость от времени поля температуры на тонкой стенке и ее зависимость от стадии развития конвективного течения после включения нагрева.

Во втором режиме стальная стенка нагревалась с внешней стороны за счет постоянного радиационного потока тепла от кварцевых ламп. На внутренней стороне тепло отдавалось в жидкость, здесь развивалось нестационарное конвективное течение и разогрев жидкости в объеме. Изучена зависимость распределений температуры по высоте стенки от времени. Исследовался процесс формирования пограничного слоя на однородно нагреваемой стенке и течения жидкости — имитатора топлива во всем объеме бака. В исходном состоянии модель бака была практически изотермической во всех экспериментах данной серии.

На рис. 2 приведена схема рабочего участка установки для проведения второй серии экспериментов. Для радиационного нагрева стальной боковой стенки полости использовались две кварцевые лампы КГ-220-1000. Длина лампы 375 мм, длина рабочей части нити 300 мм, номинальное напряжение 220 В, номинальная мощность 1000 Вт. Включались лампы через трансформатор РНО 250-10. Лампы крепились на кронштейнах к дюралевой пластине, выполняющей роль экрана. Расстояние от нити лампы до нагреваемой стенки полости составляло 300 мм. Расположены лампы вертикально, параллельно друг другу, на расстоянии 47 мм (между осями ламп) и симметрично относительно вертикальной оси рабочей пластины. Такое расположение ламп обеспечивало радиационный поток тепла, падающий на стенку, близкий к равномерному. Лампы установлены в экранирующей

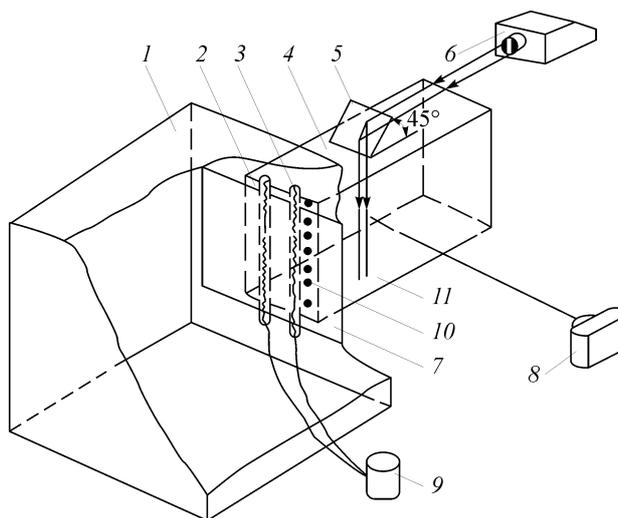


Рис. 2. Схема установки 2.

1 — кожух, 2 — торцевая нагреваемая стальная стенка, 3 — кварцевая лампа, 4 — рабочая полость, 5 — призма, 6 — источник света, 7 — шторка, 8 — фотокамера, 9 — источник питания РНО 250-10, 10 — термопары на рабочей стенке, 11 — термопары в ядре.

ший кожух из дюралевого листа Д-16. До выхода ламп на стационарный режим излучения (30–40 с после включения) рабочая стенка полости экранировалась металлической шторкой, установленной на кожухе. В начальный момент времени шторка открывалась и на рабочую стенку падал равномерный стационарный поток ИК излучения. С этого момента начиналось наблюдение за развитием структуры конвективного течения в полости и измерялись распределения температуры на стенках. Распределения температуры на внутренней стороне рабочей стенки и в ядре жидкости измерялись теми же термопарами, изготовленными из проводов диаметром 0,1 мм. Чувствительность термопар 41,7 мкВ/°С. Термопары наклеивались на стальную пластинку со стороны жидкости заподлицо с поверхностью стенки. Для этого в стенке сделаны пазы глубиной 0,1 мм и шириной 0,2 мм. Если рабочей жидкостью был спирт, то термопары клеивались в пазы силикатным клеем. При использовании в качестве рабочих жидкостей воды и водных растворов использовался циакриновый клей. Спаи термопар располагались на стенке неравномерно по высоте друг под другом на одной прямой, проведенной вдоль вертикали, параллельно боковым стенкам. Прямая линия, на которой располагались спаи термопар, удалена от боковых стенок, соответственно от одной стенки на 20 мм, а от другой на 73,5 мм. Координаты спаев при отсчете от дна полости следующие: 1 — 0 мм, 2 — 23,8 мм, 3 — 66,91 мм, 4 — 111,18 мм, 5 — 132,23 мм, 6 — 138,52 мм, 7 — 143,8 мм, 8 — 147,93 мм, 9 — 149,23 мм, 10 — 153,25 мм, 11 — 155,2 мм. Для контроля средней температуры в ядре жидкости установлены две такие же термопары. Их спаи расположены в центральном вертикальном сечении полости на уровне 50 мм от дна и на расстоянии 93 мм и 186 мм от стальной рабочей стенки. Опрос всех термопар проводился с использованием термопарного переключателя ПМТ-20 за 20 секунд (с точностью 1 с). Вначале (после включения обогрева стенки) опрос датчиков производился непрерывно, а затем с возрастающими интервалами между циклами опроса. Временной контроль проводился с помощью электронного секундомера с цифровой индикацией. По данным измерений строились непрерывные кривые изменения температуры по времени в каждой фиксированной точке (расположения спаев термопары). Сдвиг по времени между измерениями учитывался при обработке информации. Ошибка в определении момента измерения 1 с. Для характерных темпов изменения температуры боковой стальной нагреваемой стенки в проведенной серии экспериментов эта точность измерения достаточно высока и совершаемую ошибку при этом можно не учитывать. Измерения ТДС термопар выполнялись ампервольтметром Ф-30 с точностью 1 мкВ. Определение координат спаев термопар и контроль положения границы раздела “жидкость-газ” выполнялись с помощью катетометра КМ-6 с точностью измерений 0,03 мм.

При проведении второй серии опытов применялась та же отработанная в лаборатории техника визуализации и фотографирования пространственных форм течения [5–8]. В жидкость добавлялись алюминиевые частички-чешуйки. Подсветка осуществлялась в центральном сечении полости световым ножом от диапроектора со щелевой диафрагмой. Толщина высвеченной зоны составляла около 2 мм.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В первой серии экспериментов в исходном состоянии бак с жидкостью, имитатором топлива, находился в изотермическом состоянии. Рабочая жидкость (этиловый спирт) покоилась. В момент времени  $t = 0$  подавалась постоянная мощность на нагреватель  $P = 80$  Вт. Одновременно начинались видеосъемка течения жидкости,

измерение и непрерывная запись поля температуры на внешней стороне тонкой стенки тепловизором и начинался циклический опрос контрольных термопар на внутренней стороне стенки.

Тепловизор позволяет в секунду записывать до 25 кадров. Исходная информация о поле температуры на внешней стороне стальной стенки, зафиксированной на одном кадре тепловизионного фильма, хранится в виде матрицы значений температуры в  $128 \times 128 = 16384$  точках. Таким образом, измеряется мгновенное значение температуры на поверхности в 16384 точках с точностью до  $0,03 \text{ }^\circ\text{C}$ . Обработка тепловизионных фильмов позволяет получить распределение температуры по поверхности стенки и проследить изменение этого распределения в зависимости от времени. Поле температуры можно представить в виде тоновой картинке или в виде трехмерного графика  $T(x, y)$ . На рис. 3 представлены примеры измеренных характеристик поля температуры. Слева — кадр из тепловизионного фильма в виде тоновой фотографии (256 градаций серого). Светлые области соответствуют более высокой температуре. Поле температуры симметрично относительно вертикальной оси, проходящей через центральное сечение стенки. Усредненные распределения температуры по горизонтальному направлению вблизи оси в полосе шириной 10 мм, определены распределения температуры по высоте стенки в фиксированные моменты времени. Примеры приведены справа на рис. 3, *b*. Максимум температуры всегда наблюдается в горизонтальной полосе вблизи верхнего края стенки примерно на уровне свободной поверхности жидкости в баке. Динамика изменения температуры следующая: вначале нагревается стенка в горизонтальной полосе на уровне свободной поверхности жидкости в баке. Затем нагретая область продвигается вниз, и одновременно растет уровень температуры. Если проследить за вертикальной координатой точки, соответствующей температуре  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ , то скорость смещения этой точки вниз будет равна приблизительно 10 мм/мин. В процессе нагрева максимальное значение температуры монотонно увеличивается, а распределение температуры по стенке приближается к линейному. Так, через 50 мин максимальная температура равняется  $43 \text{ }^\circ\text{C}$ , а градиент температуры —  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мм}$ . Исходная температура (см. рис. 3) была  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ . Наблюдаемые пространственно-временные закономерности изменения поля температуры на стенке коррелируют с особенностями нестационарной гидродинамики имитатора топлива и с конвективным теплообменом.

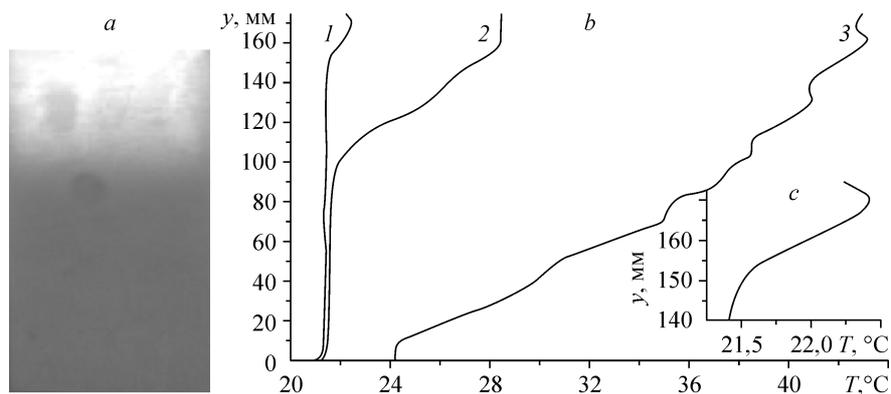


Рис. 3. Характеристики поля температуры стальной стенки.

Температура поверхности стенки через 5 минут от начала нагрева (*a*), распределение температуры по высоте стенки в центральном сечении — кривая 1 через 1 мин., кривая 2 через 5 мин., кривая 3 через 50 мин. от начала нагрева (*b*), увеличенный приповерхностный фрагмент кривой 1 (*c*).

Развивающаяся структура течения в баке непрерывно записывалась видеокамерой в течение всего времени нагрева, начиная с состояния покоя. После включения нагрева существует инкубационный период прогрева стенки — нагревателя и прилегающего к ней слоя жидкости, который зависит от размеров и теплофизических свойств материала стенки и топлива. Этот период характеризует задержку и начальный этап процесса развития течения топлива. При данных параметрах исследуемой системы этот период занимает около 14,4 сек. В деталях развитие термогидродинамического возмущения можно проследить при анализе результатов компьютерной обработки видеопленки, позволяющих просматривать развитие течения с различными скоростями. В течение инкубационного периода прогревается тонкий слой жидкости, который в некоторый момент как целое начинает столбиком всплывать. Одновременно включается действие термокапиллярного эффекта и всплывающая подогретая жидкость растекается вдоль свободной поверхности. На рис. 4 показаны зависимости положения переднего фронта термогидродинамического возмущения (тепловой волны), распространяющегося от нагретой стенки к холодной, вдоль свободной поверхности жидкости от времени, и значения скорости его распространения в зависимости от продольной координаты и времени. Движение начинается после завершения инкубационного периода. Через 21 с передний фронт возмущения достигает холодной стенки. Далее формируется интенсивная струя жидкости вдоль поверхности. Максимальное значение горизонтальной компоненты скорости наблюдается на свободной поверхности. На место всплывающей жидкости на начальной стадии процесса подтягивается жидкость из ядра, а не только из придонной области, как это происходит в установившихся режимах при стационарных граничных условиях [6—9]. При достижении холодной стенки бака течение разворачивается и как мощное возмущение (имеющее характер гидродинамической волны) чуть ниже свободной поверхности жидкости распространяется в обратном направлении. Объясняется это тем, что нагретая жидкость имеет избыточную плавучесть и не может уйти в глубину слоя. Дойдя назад до нагреваемой стенки, эта обратная волна возмущает на короткое время подъемное течение и течение вдоль свободной поверхности. За промежуток времени, равный примерно 10 с, все возмущения затухают и устанавливается

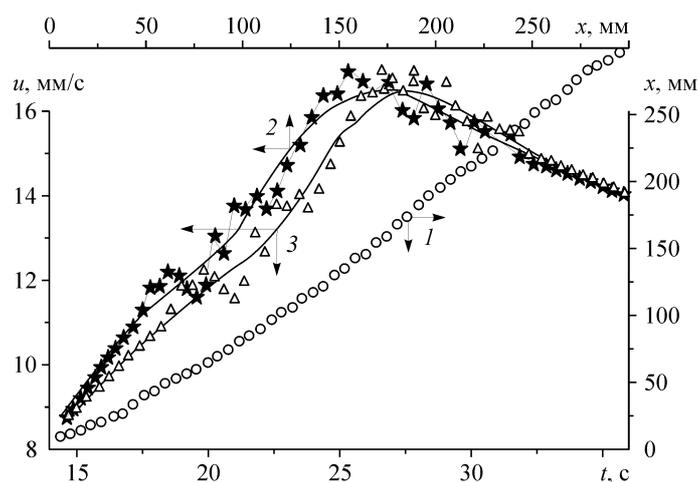


Рис. 4. Характеристики распространения начального возмущения вдоль свободной поверхности жидкости после включения нагрева.

Положение переднего фронта возмущения во времени (1), скорость продвижения фронта в зависимости от положения и от времени соответственно (2, 3).

пространственная форма приповерхностного течения, которая на качественном уровне практически остается неизменной в течение всего времени нагрева. Увеличиваются размеры по вертикали этого течения, состоящего из двух встречных потоков, и растет его скорость.

На рис. 5, *a* представлена пространственная форма развитого конвективного движения в области, прилегающей к рабочей стенке. Фотография траекторий движения жидкости получена сложением 200 видеок кадров (интервал наблюдения 8 сек). Верхний срез фотографии соответствует свободной поверхности жидкости. Течение имеет уже квазистационарный регулярный характер. За исключением пристеночной поворотной зоны течение двумерное и плоскопараллельное. На границе встречных потоков (вдоль свободной поверхности к стенке направо, а на уровне  $y = 165$  мм от стенки) видны вторичные вихри с осями, нормальными к плоскости рисунка. Справа на рис. 5, *b* показаны профили скорости в семи сечениях в виде векторов и на рис. 5, *c* показан сплошной профиль горизонтальной компоненты скорости в одном из сечений, из которого видно, что максимум скорости возвратного течения находится на уровне  $y = 165$  мм. Из рис. 5, *a* видна также еще одна особенность течения, которая может иметь существенное значение при больших перепадах температуры: на уровне  $y = 150$  мм наблюдается слабое вторичное течение к стенке, а на уровне  $y = 140$  мм — от стенки. Это типичный для устойчиво стратифицированных слоев жидкости сценарий усложнения пространственной формы течения при наличии бокового подогрева [7, 8]. В рассматриваемом случае (при заданной мощности нагревателя) эти низкоскоростные вторичные течения плохо видны при данном масштабе представления профилей скорости и слабо сказываются на поле температуры на тонкой стенке, но с ростом тепловых нагрузок их скорость вырастет и они могут иметь практическое значение. Они хорошо просматриваются в видеофильмах.

Поле скорости рассчитывалось по следующей схеме. Кадр с видеокамеры содержит  $720 \times 576$  пикселей (720 по горизонтали). Весь кадр разбивался на области по  $96 \times 14$  пикселей (эта область соответствует площади  $12 \times 1,5$  мм<sup>2</sup> реального объекта). В каждой такой области рассчитывалась усредненная за 200 секунд скорость (компоненты скорости по горизонтальной оси и по вертикальной оси), которая ставилась в соответствие координатам ее центра. Если усреднять скорость в слое  $96 \times 1$  пикселей — скорость вдоль свободной поверхности возрастет на 20 %.

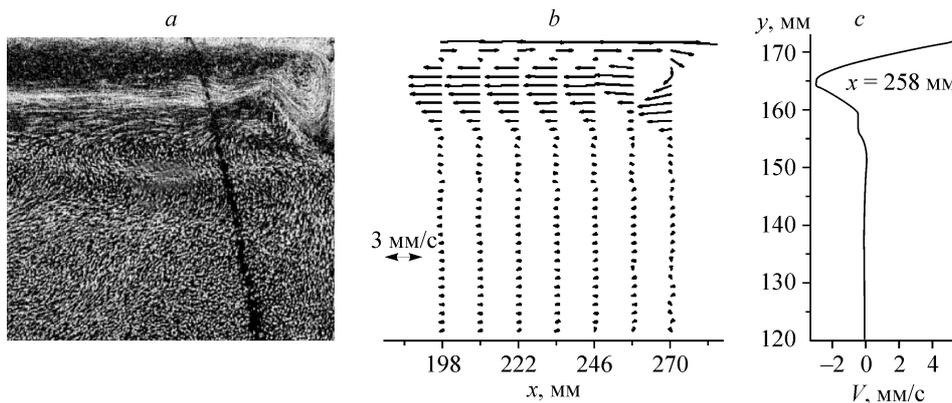


Рис. 5. Структура течения вблизи стенки и поверхности жидкости через 50 минут после начала нагрева.

Траектории движения жидкости (*a*), профили средней скорости в вертикальных сечениях (*b*), профиль средней горизонтальной компоненты скорости в вертикальном сечении:  $x = 258$  мм (*c*).

Если отследить за движением отдельных частиц вдоль поверхности жидкости по фрагментам видеофильма, можно найти максимальную скорость. Она существенно превышает усредненную скорость, показанную на профиле рис. 5, *c*, и составляет 12 мм/с для момента времени, соответствующего представленным на рис. 5 данным. Это важный момент, т. к. наличие максимальной скорости на свободной поверхности и большого приповерхностного градиента скорости является следствием и признаком влияния термокапиллярного эффекта, что подробно обсуждается в [7–9]. Для понимания особенностей локального теплообмена это также важно, т. к. из-за отмеченной особенности течения жидкость имеет максимальную температуру в тонком поверхностном слое и именно этот тонкий перегретый слой ударяет в тонкую стенку. В результате стенка нагревается локально и возникают большие локальные градиенты температуры. На качественном уровне пространственная форма течения и профили скорости соответствуют данным, полученным в [7, 8], хотя там были стационарные граничные условия.

Сравнивая картину течения жидкости в разные моменты времени с распределением температуры на стенке, можно сделать вывод, что тепловой удар при достижении тепловой волной тонкой стенки сглаживается за счет ее тепловой инерции и растекания тепла в плоскости стенки. При формировании регулярного потока вдоль свободной поверхности и с ростом температуры в натекающем потоке появляется относительно узкая нагретая полоса на стенке. Температурная полочка в верхней части стенки, хорошо наблюдаемая на профиле 2 (см. рис. 3), формируется угловым вихрем натекающей горячей жидкости и за счет растекания тепла в результате теплопроводности в плоскости стенки. В результате непрерывного подогрева и слабой теплоотдачи с внешней стороны рабочей стенки растет объем нагретой жидкости в верхней части бака, а также ее средняя температура. Сравнение профилей 2 и 3 (см. рис. 3) показывает, что в промежутке времени от 2 до 50 минут после начала нагрева вынос горячей жидкости наверх приводит к монотонному росту уровня температуры с одновременным ростом длины участка стенки с почти линейным распределением температуры по продольной координате. При этом величина градиента температуры меняется слабо. Через 50 минут при заданной мощности нагревателя профиль температуры на рабочей стенке почти линейный на всей ее длине и отражает распределение температуры в объеме жидкости по высоте слоя. Дальше форма профиля температуры остается практически неизменной, но растет монотонно во времени средняя температура. В результате профиль температуры, аналогичный по форме профилю 3 (см. рис. 3) со временем смещается вправо по горизонтальной координате (т. е. устанавливается регулярный режим теплообмена, но при наличии конвекции, аналогично [12]).

На рис. 6 представлены некоторые результаты исследования, полученные во второй серии экспериментов, когда тонкая металлическая стенка бака в заданный момент времени начинала нагреваться однородным потоком лучистой энергии

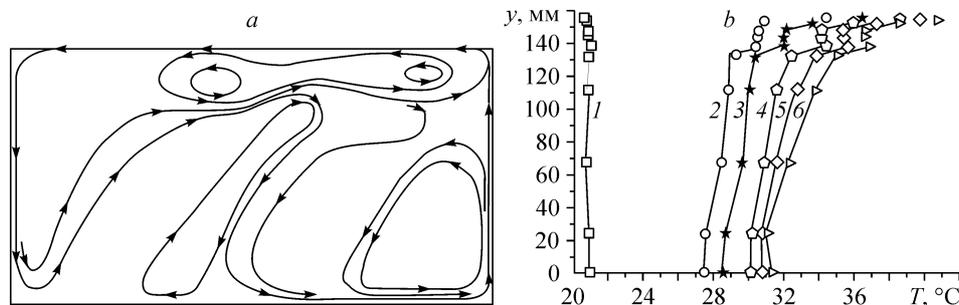


Рис. 6. Линии тока в вертикальном сечении бака (а)  $t = 16$  мин и зависимость температуры на стенке от времени (б):  $t = 0$  (1), 14 (2), 16 (3), 21 (4), 27 (5), 37 (6) мин.

с внешней стороны. В данном случае рабочая стенка была “генератором течения”, а не “пассивным приемником” подводимого от противоположной стенки тепла. Жидкость в баке перед началом нагрева была изотермической.

Оценочная плотность поглощаемого стенкой теплового излучения  $5500 \text{ Вт/м}^2$ , при этом использовали соотношение баланса тепла и измеренную зависимость температуры стальной пластины от времени, полученную для пустого бака. Необходимые для расчета теплофизические свойства стали [15]: плотность равняется  $7,27 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ , удельная теплоемкость —  $460 \text{ Дж/кг} \text{ } ^\circ\text{C}$ .

В этой серии экспериментов использовалась фотосъемка течения визуализированной жидкости с различными выдержками в зависимости от скорости течения и циклический опрос термопар. Начальная стадия и общий сценарий развития течения у вертикальной стенки после включения нагрева с ее внешней стороны в общих чертах повторяют вышеописанный процесс, когда включается электронагрев тонкой вертикальной стенки (фольги). Наблюдается короткий инкубационный период прогрева стенки и прилегающего слоя жидкости. Затем — всплывание слоя жидкости вдоль нагретой стенки и подтекание жидкости из ядра. После затухания начальных возмущений и выхода в режим монотонного разогрева у нагреваемой металлической стенки формируется устойчивое подъемное течение термогравитационной природы. В рассматриваемом случае важное значение имеют особенности пространственной формы течения в угловой области между свободной поверхностью и рабочей стенкой. Здесь, как показали измерения при стационарных граничных условиях [7, 8], возникают большие градиенты температуры вдоль свободной границы, и внутри длинного приповерхностного вихря формируется локальный интенсивный вихрь, имеющий термокапиллярную природу. В результате возникает локальный подток холодной жидкости в пограничный слой на горячей стенке. Пример траекторий движения жидкости, построенных по непрерывным трекам, полученным фотосъемкой с длительной выдержкой, показан на рис. 6, а направление движения жидкости указано стрелками. У поверхности жидкости сформировался интенсивный вихрь, занимающий всю длину бака. В интенсивность движения приповерхностного вихря существенный вклад вносит термокапиллярный эффект. Аналогичная структура течения наблюдалась и в стационарном режиме [7, 8]. Локальное понижение температуры стенки на уровне  $y = 140 \text{ мм}$  обусловлено возвратным течением под свободной поверхностью и дополнительным его локальным усилением по описанному выше механизму. Устойчивое расслоение жидкости по температуре и плотности в ядре приводит к наличию среднего продольного градиента температуры вдоль стенки. Это общее свойство не зависит от способа нагрева стенки. Но в данном случае (см. рис. 6) продольное распределение температуры более сложное, чем в вышерассмотренном, когда стенка играла роль приемника конвективно подводимого тепла. Более сложная локальная форма течения приводит к более неравномерному теплообмену в верхней части стенки и большей локальной неравномерности продольного распределения ее температуры.

Поскольку все эксперименты выполнены с использованием в качестве рабочей среды этилового спирта, то возникает вопрос о возможности применения результатов к авиационным топливам. В таблице приведены теплофизические свойства [14] этилового спирта и топлива Т-1 (керосина для дозвуковой авиации). Видно, что их свойства очень близки, а с практической точки зрения просто совпадают. Поэтому результаты экспериментов могут быть использованы для анализа процессов в области контакта трех сред в реальных условиях. Кроме того,

Таблица

## Теплофизические свойства топлив при 20 °С

Топливо	$\nu$ , мм <sup>2</sup> /с	$a$ , мм <sup>2</sup> /с	Pr	$\sigma \cdot 10^3$ , Н/м	$-(\partial\sigma/\partial T)$ , Н/мК	$\beta$ , 1/К
Этиловый спирт	2,3	0,143	16,1	22,5	$0,875 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Т-1	2,2	0,125	17,6	26,8	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$

очевидно, что безразмерные параметры, характеризующие интенсивность термогравитационной и термокапиллярной конвекции: числа Грасгофа  $Gr = (\beta g/\nu a)\Delta T \cdot L^3$  и Марангони  $Ma = [-(\partial\sigma/\partial T)/\mu a]\Delta T \cdot L$  соответственно, будут иметь практически совпадающие значения. Таким образом, результаты экспериментальных исследований, выполненных в ИТ СО РАН [5—9, 13], могут использоваться для анализа конвективных процессов в топливных баках различных размеров и конфигураций. Топлива Т-6 и Т-8В отличаются более высокой кинематической вязкостью, примерно в 4 и в 2 раза соответственно. Они имеют во столько же раз большие значения чисел Прандтля  $Pr = \nu/a$ . Здесь, как и в таблице,  $\mu$ ,  $\nu$  — коэффициенты динамической и кинематической вязкости,  $a$  — коэффициент температуропроводности,  $\sigma$  — поверхностное натяжение,  $\beta$  — коэффициент теплового объемного расширения. Как показали физические и численные исследования, основные закономерности развития пространственных форм течения и конвективного теплообмена при таких изменениях чисел Pr отличаются незначительно.

## ВЫВОДЫ

При боковом подводе тепла и развитии нестационарного конвективного течения в баке тонкая вертикальная стенка нагревается неоднородно независимо от способа ее нагрева: из-за выноса нагретого топлива вверх устанавливается устойчивая стратификация топлива по высоте слоя, и в результате температура стенки сверху всегда выше и монотонно растет во времени. На пространственную форму и интенсивность конвективного течения в баке со свободной поверхностью топлива в приповерхностном слое существенное влияние кроме сил плавучести оказывает термокапиллярный эффект. Локальный перегрев стенки наблюдается в области контакта с границей раздела „жидкость–газ“.

В режимах разогрева конвективное течение и конвективный теплообмен со временем выходят на регулярный режим, при котором закон изменения температуры по вертикальной координате приблизительно линейный, и продольное распределение температуры качественно не меняется, а происходит монотонный сдвиг по уровню средней температуры. На начальном этапе, до выхода на регулярный режим, растет со временем сверху вниз длина участка с линейным (в среднем) распределением температуры стенки.

При однородном нагреве с внешней стороны вертикальной стенки ИК излучением в баке развивается конвективное течение жидкости с более сложной пространственной формой течения вблизи свободной границы жидкости, взаимодействие которого со стенкой приводит к сильной неоднородности температуры стенки по вертикали. На структуру конвективного течения и, следовательно, на распределение температуры на стенке оказывает влияние термокапиллярный эффект. При расчетах тепловых задач в конструкциях, содержащих баки со свободной границей жидкости, необходимо рассматривать сопряженную задачу и учитывать термокапиллярный эффект на свободной поверхности топлива.

Кроме распределений температуры на тонких стенках важное значение имеет знание основных качественных закономерностей изменения полей температуры в топливных баках. От режимов конвективного теплообмена, пространственных

распределений и уровней температуры зависят процессы осадкообразования (связанные с проблемой закоксовывания топливоподающих систем ЛА) и газонасыщенности топлива. Как показывают даже сильно ограниченные объемом статьи результаты, в режимах свободной конвекции (по физической природе тепловой гравитационно-капиллярной) поле температуры сильно неоднородно по объему. Соответственно меняются свойства топлива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зарубин В.С. Температурные поля в конструкции летательных аппаратов. Методы расчета. М.: Машиностроение, 1966. 216 с.
2. Балабух Л.И., Колесников К.С., Зарубин В.С. и др. Основы строительной механики ракет. М.: Высшая школа, 1969. 496 с.
3. Полежаев В.И. Нестационарная ламинарная тепловая конвекция в замкнутой полости при заданном тепловом потоке. М.: Изв. АН СССР. МЖГ. 1970. № 4. С. 109–117.
4. Полежаев В.И. Эффект максимума температурного расслоения и его приложения // ДАН СССР. 1974. Т. 218, № 4. С. 783–786.
5. Kutateladze S.S., Berdnikov V.S. Structure of thermogravitational convection in flat variously oriented layers of liquid and on a vertical wall // Inter. J. Heat Mass Transfer. 1984. Vol. 27, No. 9. P. 1595–1611.
6. Бердников В.С., Дятлов А.В., Семенов В.И. Термогравитационная конвекция у вертикальных поверхностей теплообмена при переходных режимах течения // Теплообмен и трение в однофазных потоках. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1988. С. 5–26.
7. Бердников В.С., Забродин А.Г., Марков В.А. Тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в прямоугольной полости // Гидромеханика и процессы переноса в невесомости. Свердловск, 1983. С. 136–151.
8. Бердников В.С., Забродин А.Г., Марков В.А. Тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в полости с различно нагретыми торцевыми стенками // Структура вынужденных и термогравитационных течений. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1983. С. 147–163.
9. Бердников В.С., Гапонов В.А. Тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в прямоугольных полостях // Тр. II Росс. симпозиума “Процессы теплопереноса и рост монокристаллов и тонкоплочных структур (НТ&СГ'97)”. 22-24 сент. 1997 г., Обнинск. С. 35–46.
10. Полежаев В.И. Конвективное взаимодействие в цилиндрическом сосуде, частично заполненном жидкостью, при подводе тепла к боковой и свободной поверхностям и дну // Известия АН СССР. МЖГ. 1983. № 4. С. 77–88.
11. Черкасов С.Г. Естественная конвекция в вертикальном цилиндрическом сосуде при подводе тепла к боковой и свободной поверхностям // Известия АН СССР. МЖГ. 1984. № 6. С. 51–56.
12. Бердников В.С., Лиханский П.М., Марков В.А., Мокрушников П.В. Нестационарная термогравитационная конвекция в плоских прослойках жидкости различной ориентации // Структура гидродинамических потоков (вынужденное течение, тепловая конвекция): АН СССР / Сб. науч. тр. ИТ СО АН СССР. 1986. С. 94–107.
13. Гапонов В.А. Численное исследование ламинарного термокапиллярного течения в квадратной полости // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 4. С. 81–89.
14. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
15. Иванов Г.Н. Тепловые свойства веществ: Справочная таблица. М.: ЦНИИатоминформ, 1979. 173 с.

*Статья поступила в редакцию 2 июля 2009 г.*