

тери импульса и энергии. Однако для решения сопряженных задач теплообмена в пограничном слое и теплопроводности в теле, что как раз и необходимо при решении задач аэродинамического нагрева летательных аппаратов, метод интегральных соотношений не годится, так как на границах сопряжения требуется непрерывность не интегральных, а теплогазодинамических характеристик.

Вследствие этого наиболее широкое применение получил метод Дородницына – Лаза, основой которого является сведение систем уравнений в частных производных пограничного слоя к системам обыкновенных дифференциальных уравнений, с помощью которого можно проводить как анализ тепломассопереноса, так и расчет характеристик пограничного слоя – компонентов вектора скорости, плотности, энтальпии, тепловых потоков, концентраций компонентов газодинамической смеси в локально-одномерной (автомодельной) постановке по толщине пограничного слоя. В результате итоговая система обыкновенных дифференциальных уравнений будет также нелинейна, но ее существенно легче анализировать и решать, чем систему уравнений в частных производных. С помощью этих уравнений исследуется течение и теплообмен в критической точке и ее окрестности, где теплообмен максимальный и на пластине, где продольная составляющая градиента давления равна нулю в случае бинарной смеси газов, состоящей из частиц атомов и молекул и т. п.

В данной главе на основе переменных Дородницына – Лаза проводится анализ и вывод формул для определения тепловых потоков к телу от реагирующего сжимаемого градиентного пограничного слоя и температур тела. Приводятся примеры расчетов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-08-00880).*

УДК 536.4.08

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН В ОГРАНИЧЕННЫХ ОБЛАСТЯХ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ**

*В. Ф. ФОРМАЛЕВ, С. А. КОЛЕСНИК, Е. Л. КУЗНЕЦОВА  
Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

При волновом теплопереносе закон теплопроводности отличается от классического градиентного закона Фурье дополнительным слагаемым, которое равно произведению времени релаксации на скорость изменения теплового потока. Этот закон теплопроводности называют законом Вернотта – Каттанео – Лыкова [1]. Необходимо отметить, что время релаксации является достаточно малой величиной, и для того чтобы это дополнительное слагаемое имело достаточный порядок, необходимы очень высокие скорости нагрева. Поэтому моделирование волнового теплопереноса имеет смысл при высокоинтенсивном импульсном нагреве, например высокомошными лазерами. Уравнение теплопроводности на основе этого закона является уравнением гиперболического типа, в отличие от классического уравнения теплопроводности на основе закона Фурье, где уравнение параболического типа [1].

Сложность решения задач волнового теплопереноса на основе уравнения теплопроводности гиперболического типа заключается в возникновении подвижных по пространству и времени фронтов, на которых наблюдаются разрывы температурных профилей и тепловых потоков, причем амплитуды этих разрывов уменьшаются со временем за счет диссипации энергии.

Если тело полубесконечное, то в нем возникают бегущие тепловые волны с уменьшающимися амплитудами разрывов. Такие явления рассматривались в работах Карташова Э. М. [3], Формалева В. Ф., Колесника С. А. и др. [4–6].

В этих работах описано математическое моделирование бегущих тепловых волн в полубесконечных средах. Однако волновой теплоперенос в ограниченных средах не рассматривался, поскольку отражение тепловых волн от противоположной границы существенно отличается от отражения механических волн. Тепловая волна, достигнув противоположной *теплоизолированной* границы полностью поглощается ею с повышением температуры, а затем от противоположной границы идет обратная тепловая волна, которая складывается с другой тепловой волной, идущей от левой границы к правой границе.

В работе с помощью аналитического решения моделируется волновой теплоперенос на основе анализа динамики изолированной тепловой волны. Изолированная тепловая волна возникает под действием теплового импульса, действующего в течение короткого времени, и продвигается по холодной области. В отличие от непрерывного теплового процесса в неравновесном состоянии, когда возникает

подвижной фронт бегущей тепловой волны в полубесконечном теле, тепловая волна имеет два фронта – передний и задний, между которыми наблюдается распределение температур по пространственной переменной, причем на этих фронтах наблюдаются разрывы первого рода температурного распределения с уменьшающейся амплитудой за счет диссипации тепловой энергии.

Установлен механизм отражения тепловой волны от границ тела, получены вторичные волны при отражении от правой границы, а затем вторичной волны – от левой границы к правой и т.д. При этом носители изолированных тепловых волн по пространственной переменной не изменяются, а амплитуды температур передних и задних фронтов изолированных волн подвержены разрывам первого рода.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-01-00523 А.*

#### Список литературы

- 1 **Соболев, С. Л.** Процессы переноса и бегущие волны в условиях локально-неравновесных систем / С. Л. Соболев // Успехи физических наук. – 1991. – Т. 161, № 3. – С. 5–16.
- 2 **Шашков, А. Г.** Волновые явления теплопроводности / А. Г. Шашков, А. В. Бубнов, С. Ю. Яновский. – М. : УРСС, 2004. – 248 с.
- 3 **Карташов, Э. М.** Математическое моделирование теплопроводности с двухфазным запаздыванием / Э. М. Карташов // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 89, № 2. – С. 338.
- 4 **Колесник, С. А.** Идентификация компонентов тензора теплопроводности анизотропных композиционных материалов / С. А. Колесник // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 111–120.
- 5 **Формалев, В. Ф.** Математическое моделирование аэрогазодинамического нагрева затупленных анизотропных тел / В. Ф. Формалев, С. А. Колесник. – М. : Изд-во МАИ, 2016. – 160 с.
- 6 **Формалев, В. Ф.** Методика, алгоритм и программный комплекс по определению теплового состояния охлаждаемых микро ракетных двигателей / В. Ф. Формалев, С. А. Колесник // Труды МАИ. – 2014. – № 78.

УДК 378.016:614.8

## ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ КАК КОМПЕТЕНЦИИ БУДУЩЕГО СПЕЦИАЛИСТА ПОСРЕДСТВОМ ДИСЦИПЛИН ХИМИЧЕСКОГО БЛОКА

*Л. В. ЧЕРНЫШЕВА*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Особенности современного мира, такие как усиление потоков академического обмена студентами и магистрантами; создание большого количества межгосударственных компаний; возможность получения услуг здравоохранения в других странах; возрастание количества туристических поездок населения всех стран и доступность туристических услуг – всё это способствует увеличению объема и протяженности поездок населения стран. Все большее количество людей становится участниками железнодорожных поездок и авиаперелетов.

Государство и администрации вокзалов, аэропортов делают всё возможное, чтобы предупредить возникновение опасных для жизни ситуаций для пассажиров. На железнодорожном вокзале, станциях и в электропоездах регулярно по громкоговорителю передаются предупреждения Белорусской железной дороги о том, что нужно соблюдать максимальную бдительность, находясь вблизи путей. Но ежегодно продолжает возрастать количество случаев, приводящих к увечьям, травмам и нередко к смерти людей на вокзалах, в поездках [2].

Поэтому одной из важнейших задач для железнодорожного транспорта являлась и остается задача создания эффективной организационно-технической системы обеспечения требуемого уровня защищенности объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта от актов незаконного вмешательства, снижение рисков совершения противоправных действий в отношении участников и минимизация возможных ущербов (экономического, физического и т. д.) [1].

В связи с этим специалисты, работающие на железнодорожном транспорте, должны обладать не только высоким уровнем специальной подготовки, но и обладать достаточным уровнем компетенций в области безопасности жизнедеятельности.

Безопасность жизнедеятельности на железнодорожном транспорте как компетенция специалиста представляет собой интегративное качество личности. Становление данной компетенции позво-