

прочность супесей, определенную по величине сопротивления погружению конуса  $q_c$ , существенное влияние оказывает наличие в составе и количество песчаных частиц (от тонких до грубых) и даже гравийных (от мелких до средних) в супесях прочных и очень прочных.

Проведено сравнение результатов определения деформационных и прочностных характеристик грунтов методами штамповых испытаний и консолидировано-дренированного плоского среза с результатами исследований статическим зондированием.

С увеличением пластичности глинистых грунтов возрастает общее сопротивление сдвигу и деформируемость, удельное сопротивление по боковой поверхности зонда уменьшается. Для сопротивления погружению конуса зависимость от глинистости не прослеживается.

Отношение значений модулей деформации грунтов, определенных штамповыми испытаниями  $E_{ш}$ , к модулям, определенным по данным зондирования  $E_{зонд}$  для песков мелких и пылеватых находятся близко к единице и не превышает 1,5. Значения модуля деформации супесей, полученные при штамповых испытаниях, превышают значения, полученные при статическом зондировании, в 2,5 раза. Для суглинков значения модулей деформации, полученные при зондировании, могут оказаться больше в два раза.

Следовательно, применение только методов зондирования для определения количественных показателей физико-механических свойств грунтов может привести к грубым ошибкам при прогнозе осадок естественных оснований.

Следует отметить, что полученные механические характеристики грунтов использовались при расчетах композитных элементов конструкций, связанных с упругим основанием [11–13].

#### Список литературы

- 1 **Трацевская, Е. Ю.** Особенности тектоники территории г. Гомеля в связи с оценкой устойчивости геологической среды / Е. Ю. Трацевская, А. Н. Галкин, И. А. Красовская // *Літасфера*. – 2003. – № 1 (18). – С. 78–85.
- 2 **Трацевская, Е. Ю.** Закономерности развития суффозионно-просадочных явлений на территории Белоруссии / Е. Ю. Трацевская, А. Н. Галкин // *Инженерная геология массивов лессовых пород : тр. междунар. науч. конф. ; под ред. В. Т. Трофимова, В. А. Королева*. – М. : 2004. – С. 108–109.
- 3 **Трацевская, Е. Ю.** Особенности формирования техногенного подтопления дисперсных грунтов / Е. Ю. Трацевская // *Природные ресурсы*. – 2008. – № 2. – С. 106–112.
- 4 **Трацевская, Е. Ю.** Современное динамическое состояние геологической среды г. Гомеля и его влияние на инженерно-геологические условия / Е. Ю. Трацевская, О. К. Абрамович // *Літасфера*. – 2008. – № 2 (29). – С. 129–137.
- 5 **Трацевская, Е. Ю.** Геологическая опасность развития подтопления грунтов и оценка экономических рисков при ее реализации / Е. Ю. Трацевская // *Природные ресурсы*. – 2009. – № 1. – С. 102–109.
- 6 **Трацевская, Е. Ю.** Влияние развития техногенного подтопления в дисперсных грунтах на надежность системы «основание – фундамент – здание» / Е. Ю. Трацевская // *Экология урбанизированных территорий*. – 2011. – № 2. – С. 71–76.
- 7 **Трацевская, Е. Ю.** Динамическая неустойчивость квазитиксотропных моренных грунтов / Е. Ю. Трацевская // *Літасфера*. – 2017. – № 1 (46). – С. 107–111.
- 8 **Трацевская, Е. Ю.** Характеристики пластичности супесчаных неводонасыщенных грунтов юго-востока Беларуси / Е. Ю. Трацевская // *Літасфера*. – 2018. – № 1 (48). – С. 12–17.
- 9 **Трацевская, Е. Ю.** Демпфирующие свойства слабосвязных трехфазных грунтов / Е. Ю. Трацевская // *Літасфера*. – 2019. – № 2 (51). – С. 115–121.
- 10 **Трацевская, Е. Ю.** Экспериментальное исследование параметров автотранспортного вибродинамического воздействия на массивы грунтов / Е. Ю. Трацевская // *Вестник БелГУТа: Наука и транспорт*. – 2020. – № 1 (40). – С. 58–61.
- 11 **Старовойтов, Э. И.** Колебания круговых композитных пластин на упругом основании под действием локальных нагрузок / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // *Механика композитных материалов*. – 2016. – Т. 52, № 5. – С. 943–954.
- 12 **Starovoitov, E. I.** Resonance vibrations of circular composite plates on an elastic foundation / E. I. Starovoitov, D. V. Leonenko, D. V. Tarlakovsky // *Mechanics of Composite Materials*. – 2015. – Vol. 51, no. 5. – P. 561–570.
- 13 **Gorshkov, A. G.** Harmonic Vibrations of a Viscoelastoplastic Sandwich Cylindrical Shell / A. G. Gorshkov, É. I. Starovoitov, A. V. Yarovaya // *International applied mechanics*. – 2001. – Vol. 37, no. 9. – P. 1196–1203.

УДК 539.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩИХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ НА ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛАХ

*О. В. ТУШАВИНА*

*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Для исследования существенно нелинейной системы уравнений пограничного слоя широко используются различные численные методы. Для нереагирующих пограничных слоев ранее широко использовался метод интегральных соотношений Кармана путем введения толщин вытеснения, по-

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