

## ТЕПЛОМАССОБМЕН И ФИЗИЧЕСКАЯ ГАЗОДИНАМИКА НА СТРАНИЦАХ ЖУРНАЛА “ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР”. К 60-ЛЕТИЮ ЖУРНАЛА

© 2023 г. А. Ю. Вараксин<sup>1, 2, \*</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

\*E-mail: varaksin\_a@mail.ru

DOI: 10.31857/S004036442306011X

В этом году исполнилось 60 лет с выхода первого номера журнала “Теплофизика высоких температур”. На протяжении этого времени одним из основных разделов журнала является раздел, посвященный исследованиям в области теплообмена и физической газодинамики.

В 2020 г., например, в этом разделе были опубликованы 44 статьи; в 2021 г. — 53 статьи, а в 2022 г. — 58 статей, включая обзоры и краткие сообщения, что немного не дотягивает до 50% всего портфеля журнала.

Опубликованные статьи достаточно полно представляют все основные направления исследований теплообмена (вынужденная конвекция однофазной жидкости; свободная конвекция; теплообмен при химических превращениях; теплообмен при кипении, испарении и конденсации; теплообмен в двухфазных потоках и пористых средах; интенсификация теплообмена; теплопроводность и теплоизоляция; радиационный и сложный теплообмен; прикладные задачи) и сопряженных с ними задач физической газодинамики.

Теплообмен при вынужденной конвекции является, пожалуй, самым распространенным способом передачи тепла. Теплоотдача возрастает с увеличением скорости теплоносителя, а сам процесс осложняется. А.И. Леонтьевым и др. [1] предложен эффективный метод определения коэффициента восстановления температуры в пограничном слое на проницаемой пластине. Этим же коллективом авторов представлен обзор [2] имеющихся исследований по изучению характеристик сжимаемого турбулентного пограничного слоя, в том числе и коэффициента восстановления температуры.

А.Ф. Поляковым выполнен большой цикл работ по гидродинамике и теплообмену в условиях смешанной конвекции. Так, в [3] изучен процесс развития вторичной турбулентной циркуляции в горизонтальных трубах при локальной устойчивой стратификации плотности. Сложный случай трехмерной турбулентной конвекции внутри па-

раллелепипеда с нагревом двух противоположных вертикальных стенок рассмотрен в работе В.И. Терехова и А.Л. Экайда [4]. Ограничения модели Буссинеска на примере ламинарной естественной конвекции газа между вертикальными изотермическими стенками описаны и проанализированы в работе С.Г. Черкасова и др. [5].

Наличие химических реакций (и главной из них — реакции горения) сильно осложняет процессы теплообмена. Большой цикл работ, посвященных формированию и развитию детонационных волн, выполнен В.В. Голубом с коллегами. Так, в [6] изучен процесс формирования пересжатой волны детонации в потоке метано-кислородных смесей в канале переменного сечения. А.В. Ереминым и сотрудниками выполнен цикл исследований термического разложения (пиролиза) углеводородов за ударными волнами. В частности, в [7] рассмотрен важный вопрос о влиянии малой примеси ацетилена на процесс термического саморазложения ацетиленов. Моделирование воспламенения и детонации метано-воздушных смесей за отраженной ударной волной выполнено В.Ю. Гидасповым и др. [8]. Развитие нестационарных процессов горения во вспененных эмульсиях изучено в работе И.С. Яковенко и А.Д. Киверина [9]. В работе В.В. Азатьяна и др. [10] исследованы зависимости характеристик распространения пламени от протекания гетерогенных реакций промежуточных частиц.

Теплообмен при кипении, испарении и конденсации — отдельная большая область теории теплообмена. Ю.А. Зейгарником с сотрудниками выполнен большой цикл исследований, посвященных изучению процессов теплообмена при кипении. Так, в [11] ими изучены характеристики процесса кипения воды, недогретой до температуры насыщения, на структурированных поверхностях. Современное состояние исследований интенсификации теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях проанализировано в об-

зорной работе А.Н. Павленко с сотрудниками [12]. В.В. Яговым с коллегами опубликован цикл исследований по теплообмену при пленочном кипении. В [13, 14] изучено влияние углеродистого покрытия на теплообмен и механизм дестабилизации паровой пленки при нестационарном пленочном кипении. Вопрос об устойчивости скачков вскипания рассмотрен в статье А.А. Авдеева [15]. Работа Ю.В. Майданика и С.В. Вершинина [16] посвящена основам разработки и исследованию контурных тепловых труб с плоскими испарителями.

Интерес многочисленных групп исследователей к изучению гидрогазодинамики и тепломассообмена в двухфазных потоках различных типов (газ—частицы, газ—капли, жидкость—частицы, жидкость—пузыри) не ослабевает уже на протяжении нескольких десятилетий. В последние годы в журнале опубликован большой цикл работ Д.А. Губайдуллина с соавторами ([17, 18] и др.), посвященный широкому спектру задач поведения двухфазных сред с твердыми частицами, каплями и пузырями при акустическом воздействии. Результаты большинства этих работ обобщены в обзоре [19]. А.Л. Стасенко с коллегами [20] выполнено исследование теплообмена капли, ускоряемой потоком воздуха вдоль поверхности твердого тела, при обледенении летательного аппарата. М.А. Пахомовым и В.И. Тереховым [21] изучены особенности распределения концентрации частиц в газокапельном ограниченном закрученном потоке на основе эйлерова и лагранжевого подходов. Б.Г. Покусаевым с коллегами [22] рассмотрены вопросы критического истечения парожидкостного потока через зернистый слой. Систематизация результатов работ, опубликованных в журнале по многофазным потокам, содержится также в обзорах [23–25].

Интенсификация процессов переноса теплоты и массы — классическое направление исследований в области тепломассообмена. К настоящему времени используется широкий спектр возможных методов и способов. Детальные исследования возможностей интенсификации теплоотдачи и реализующихся критических тепловых потоков при кипении на поверхностях с микрооребрением выполнены И.А. Поповым и др. [26]. С.Э. Тарасевичем и др. [27] изучены возможности увеличения теплоотдачи в канале с оребренными скрученными лентами. С.А. Исаевым и др. [28] исследованы возможности интенсификации теплообмена при ламинарном и турбулентном течении в узком канале с однорядными овальными лунками. Особенности интенсификации теплопереноса в пленке жидкости, стекающей по стенке, в различных условиях рассмотрены в работах А.Н. Павленко и др. [29], С.П. Актершева и др. [30], Е.А. Чиннова [31].

Большое внимание уделяется решению важных для целого ряда практических приложений

обратных задач теплопроводности. А.Н. Дилигенской [32] развит метод минимаксной оптимизации в двумерной граничной обратной задаче теплопроводности. Уточненное решение вариационной задачи идентификации математических моделей теплообмена с сосредоточенными параметрами получено А.Г. Викуловым и А.В. Ненароковым [33]. В.Ф. Формалевым и др. [34, 35] рассмотрены обратные граничные задачи теплопроводности по восстановлению тепловых потоков к анизотропным телам с нелинейными характеристиками теплопереноса.

Аналитические методы на протяжении многих десятилетий играют одну из главенствующих ролей в изучении теплопроводности. Вариационная форма модели теплового взрыва в твердом теле с зависящей от температуры теплопроводностью построена В.С. Зарубиным и др. [36]. Э.М. Карташовым развиты аналитические подходы к исследованиям нестационарной теплопроводности для частично ограниченных областей [37] и решены краевые задачи для уравнений параболического типа в нецилиндрических областях [38]. Аналитический метод расчета собственных чисел в задаче нестационарной теплопроводности сферического тела предложен Ю.В. Видиным и В.С. Злобиным [39].

Учет радиационной составляющей теплового потока необходим при высоких скоростях и, соответственно, температурах, реализуемых в авиационной и ракетно-космической технике. С.Т. Суржиковым и М.П. Шуваловым [40] выполнен обзор работ, касающихся вопросов тестирования расчетных данных по радиационному и конвективному нагреву спускаемых космических аппаратов нового поколения. Сравнительный анализ роли спектральных линий атомов и ионов в радиационном нагреве поверхностей четырех типов спускаемых космических аппаратов проведен С.Т. Суржиковым [41]. К.Н. Ефимовым и др. [42] выполнен численный анализ характеристик теплообмена при радиационно-конвективном нагреве конуса, затупленного по сфере. Вопросы о величинах критической и оптимальной толщин теплоизоляции при радиационно-конвективном теплообмене рассмотрены В.С. Зарубиным и др. [43].

Историческими направлениями исследований тепломассообмена и физической газодинамики, широко представленными в журнале, являются направления, связанные с созданием научного задела в области проектирования перспективных объектов ракетно-космической техники. В частности, сюда относится изучение возможностей совершенствования методов тепловой защиты и процессов в жидкостных и твердотопливных ракетных двигателях и т.п. Среди последних работ можно выделить статьи В.В. Миронова [44], В.В. Горского [45] и Д.А. Ягодникова [46] с коллегами.

Значительное число статей посвящено решению различных задач тепломассообмена, связанных с развитием ядерных энергетических установок. Современное состояние и тенденции развития системных теплогидравлических кодов рассмотрены в работе В.Г. Асмолова и др. [47]. Результаты экспериментального исследования высокотемпературного взаимодействия стали со свинцовым теплоносителем приведены в работе В.И. Альмяшева и др. [48]. В.И. Мелиховым и др. выполнен обзор особенностей взаимодействия высокотемпературных расплавов с жидкостями [49]. Исследования гидродинамики теплоносителя за перемешивающимися решетками-интенсификаторами тепловыделяющих сборок реактора PWR проведены С.М. Дмитриевым и др. [50]. В.Д. Озриным и А.С. Филипповым [51] построена новая модель разложения бетона и плавления его остаточных компонентов при взаимодействии с расплавом в шахте водо-водяного реактора при тяжелой аварии.

Другим важным направлением прикладных исследований является изучение тепломассообменных процессов при совершенствовании систем нефтегазодобычи. Л.А. Ковалевой и др. [52] выполнены экспериментальные исследования нагрева нефтенасыщенных горных пород электромагнитным полем. Особенности разработки гидратного пласта тепловым воздействием рассмотрены В.Ш. Шагаповым и М.Р. Давлетшиной [53]. Ф.Ф. Давлетшиным и Р.Ф. Шарафудиновым [54] выполнены численные исследования теплообменных процессов в системе пласт–трещина гидроразрыва в режиме постоянного отбора. Физическое и математическое моделирование распределений температуры по длине нефтематеринской породы при микроволновом излучении проведены Р.Р. Зиннатуллиным с соавторами [55].

В связи с 60-летним юбилеем журнала следует отметить, что все эти годы он занимал одну из лидирующих позиций в освещении достижений в области тепломассообмена и физической газодинамики, и пожелать сохранения высокого авторитета журнала в обозримом будущем.

#### СПИСОК ИЗБРАННЫХ СТАТЕЙ

1. Леонтьев А.И., Луцик В.Г., Макарова М.С. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 2. С. 255.
2. Леонтьев А.И., Луцик В.Г., Макарова М.С., Попович С.С. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 3. С. 455.
3. Поляков А.Ф. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 854.
4. Терехов В.И., Экаид А.Л. // ТВТ. 2015. Т. 53. № 3. С. 412.
5. Черкасов С.Г., Ананьев А.В., Моисеева Л.А. // ТВТ. 2018. Т. 56. № 6. С. 902.
6. Бивол Г.Ю., Головастов С.В., Голуб В.В. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 4. С. 576.
7. Гуренцов Е.В., Дракон А.В., Еремин А.В., Михеева Е.Ю. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 6. С. 897.
8. Гидаспов В.Ю., Кононов Д.С., Северина Н.С. // ТВТ. 2020. Т. 58. № 6. С. 909.
9. Яковенко И.С., Киверин А.Д. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 6. С. 928.
10. Азатян В.В., Прокопенко В.М., Сон Э.Е., Абрамов С.К. // ТВТ. 2023. Т. 61. № 1. С. 91.
11. Васильев В.В., Вараксин А.Ю., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Эпельфельд А.В. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 6. С. 712.
12. Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н. // ТВТ. 2021. Т. 59. № 2. С. 280.
13. Дедов А.В., Забиров А.Р., Слива А.П., Федорович С.Д., Ягов В.В. // ТВТ. 2019. Т. 57. № 1. С. 72.
14. Канин П.К., Ягов В.В., Забиров А.Р., Молотова И.А., Виноградов М.М., Рязанцев В.А. // ТВТ. 2023. Т. 61. № 2. С. 241.
15. Авдеев А.А. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 769.
16. Майданик Ю.Ф., Вершинин С.В. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 3. С. 407.
17. Губайдуллин Д.А., Кабиров А.А., Шайдуллин Л.Р., Фадеев С.А. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 6. С. 953.
18. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р., Фадеев С.А. // ТВТ. 2023. Т. 61. № 1. С. 145.
19. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Осипов П.П., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р. // ТВТ. 2021. Т. 59. № 3. С. 443.
20. Жбанов В.А., Стасенко А.Л., Токарев О.Д. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 6. С. 860.
21. Пахомов М.А., Терехов В.И. // ТВТ. 2020. Т. 58. № 6. С. 896.
22. Храмов Д.П., Покусаев Б.Г., Некрасов Д.А., Вязьмин А.В. // ТВТ. 2021. Т. 59. № 2. С. 195.
23. Вараксин А.Ю. // ТВТ. 2020. Т. 58. № 4. С. 646.
24. Вараксин А.Ю. // ТВТ. 2020. Т. 58. № 5. С. 789.
25. Вараксин А.Ю. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 2. С. 291.
26. Попов И.А., Шелчков А.В., Гортышов Ю.Ф., Зубков Н.Н. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 4. С. 537.
27. Тарасевич С.Э., Шишкин А.В., Гиниятуллин А.А. // ТВТ. 2020. Т. 58. № 1. С. 107.
28. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Корнев Н.В., Хассель Э., Чудновский Я.П. // ТВТ. 2015. Т. 53. № 3. С. 390.
29. Павленко А.Н., Суртаев А.С., Цой А.Н., Стародубцева И.П., Сердюков В.С. // ТВТ. 2014. Т. 52. № 6. С. 886.
30. Актершев С.П., Барташевич М.В., Чиннов Е.А. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 1. С. 115.
31. Чиннов Е.А. // ТВТ. 2016. Т. 54. № 3. С. 485.
32. Дилигенская А.Н. // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. С. 226.
33. Викулов А.Г., Ненарокомов А.В. // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. С. 234.
34. Формалев В.Ф., Колесник С.А. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 4. С. 564.
35. Колесник С.А., Формалев В.Ф., Кузнецова Е.Л. // ТВТ. 2015. Т. 53. № 1. С. 72.
36. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. // ТВТ. 2018. Т. 56. № 2. С. 235.
37. Карташов Э.М. // ТВТ. 2020. Т. 58. № 3. С. 402.
38. Карташов Э.М. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 5. С. 725.
39. Видин Ю.В., Злобин В.С. // ТВТ. 2023. Т. 61. № 2. С. 315.

40. Суржиков С.Т., Шувалов М.П. // ТВТ. 2013. Т. 51. № 3. С. 456.
41. Суржиков С.Т. // ТВТ. 2016. Т. 54. № 2. С. 249.
42. Ефимов К.Н., Овчинников В.А., Якимов А.С., Гагар С.А. // ТВТ. 2019. Т. 57. № 1. С. 83.
43. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. // ТВТ. 2016. Т. 54. № 6. С. 883.
44. Миронов В.В., Толкач М.А., Тлевцежев И.Ю. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 4. С. 575.
45. Горский В.В. ТВТ. 2020. Т. 58. № 2. С. 249.
46. Ягодников Д.А., Ворожеева О.А., Новиков А.О. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 5. С. 774.
47. Асмолов В.Г., Блинков В.Н., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В., Емельянов Д.А., Киселев А.Е., Долганов К.С. // ТВТ. 2014. Т. 52. № 1. С. 105.
48. Альмяшев В.И., Хабенский В.Б., Крушинов Е.В., Витоль С.А., Котова С.Ю., Шевченко Е.В., Каляго Е.К., Сулацкий А.А., Стрижов В.Ф., Мосунова Н.А. // ТВТ. 2021. Т. 59. № 5. С. 762.
49. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 2. С. 280.
50. Дмитриев С.М., Добров А.А., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Легчанов М.А., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Хробостов А.Е. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 3. С. 399.
51. Озрин В.Д., Филиппов А.С. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 6. С. 906.
52. Ковалева Л.А., Зиннатуллин Р.Р., Султангужин Р.Ф., Шрубковский И.И., Мясников А.В. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 858.
53. Шагапов В.Ш., Давлетишина М.Р. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 1. С. 131.
54. Давлетишин Ф.Ф., Шарафутдинов Р.Ф. // ТВТ. 2022. Т. 60. № 2. С. 260.
55. Зиннатуллин Р.Р., Мусин А.А., Гайсин И.В., Усманов Б.А. // ТВТ. 2023. Т. 61. № 1. С. 149.