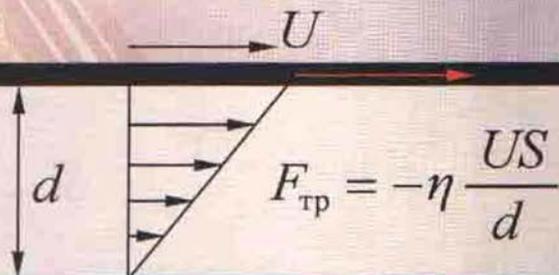


# ВЯЗКОСТЬ

## И ЕЕ РОЛЬ В ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ



ФГУП «Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики»

**В. А. Огородников**

**ВЯЗКОСТЬ  
И ЕЕ РОЛЬ В ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ**

Монография

Саров  
2012

УДК 534.222.2  
ББК 22.23  
О-39

Рецензент доктор физ.-мат. наук О. Б. Дреннов

### **Огородников В. А.**

О-39 Вязкость и ее роль в динамических процессах. Монография. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2012. – 239 с.: ил.  
ISBN 978-5-9515-0201-8

Рассмотрены различные агрегатные состояния вещества и характер взаимодействия между частицами, транспортные свойства в веществах и коэффициенты переноса: диффузия, вязкость, теплопроводность и электропроводность. Обсуждены различные модели транспортных явлений, при этом основное внимание уделено вязкости веществ. Описаны экспериментальные методы определения коэффициента динамической вязкости в статических и динамических экспериментах. Большое внимание в монографии уделено диссипативным потерям при анализе различных динамических процессов.

Книга будет полезна для научных работников, аспирантов и студентов, занимающихся физикой высоких давлений и температур, физикой ударных волн и быстропротекающих процессов, а также для инженерно-технических работников и конструкторов, связанных с созданием устройств, функционирующих в экстремальных условиях высокоскоростного ударного и интенсивного теплового нагружения.

УДК 534.222.2  
ББК 22.23

## СОДЕРЖАНИЕ

Основные обозначения и сокращения .....	6
Введение .....	8
Глава 1. Транспортные и диссипативные процессы в веществе ....	15
1.1. Агрегатное состояние вещества .....	15
1.1.1. Кристаллические вещества .....	15
1.1.2. Жидкости .....	27
1.1.3. Газы .....	30
1.1.4. Уравнение состояния идеального газа .....	33
1.1.5. Уравнение состояния ван-дер-ваальсова газа .....	43
1.2. Транспортные свойства веществ, коэффициенты переноса .....	48
1.3. Диссипативные процессы .....	57
Список литературы к главе 1 .....	64
Глава 2. Модели поведения вязкой среды .....	66
2.1. Модель вязкопластической среды .....	66
2.2. Активационная модель .....	68
2.3. Кинетически-столкновительная модель .....	74
2.4. Фрактальная модель .....	77
Список литературы к главе 2 .....	85
Глава 3. Методы измерения коэффициента динамической вязкости .....	89
3.1. Экспериментальные методы измерения вязкости при сравнительно низких давлениях ( $p \leq 20$ ГПа) .....	90
3.1.1. Метод Стокса .....	91
3.1.2. Метод кристаллизации .....	91

3.1.3. Метод меченых атомов .....	92
3.1.4. Результаты измерений и модельных оценок вязкости при сравнительно низких давлениях ( $p \leq 20$ ГПа) .....	93
3.2. Расчетные оценки вязкости при высоких давлениях ....	102
3.3. Методы измерения вязкости при ударно-волновом нагружении .....	107
3.3.1. Метод свободных затухающих колебаний оболочек .....	109
3.3.2. Оценки вязкости по ширине фронта ударной волны .....	111
3.3.3. Оценки вязкости по скоростным зависимостям сопротивления материалов деформированию при сжатии в ударных волнах и растяжению при отколе .....	115
3.3.4. Метод фиксированных линий .....	117
3.3.5. Оценки вязкости жидкости по измерению скорости разгоняемых в ней цилиндрических тел .....	121
3.3.6. Оценки вязкости твердых и жидких материалов по развитию возмущений на фронте ударной волны ...	125
3.3.7. Верхняя оценка вязкости по формированию микроструеобразования из канавки на свободной поверхности образца при выходе на нее УВ .....	129
3.3.8. Экспериментально-расчетный метод оценки вязкости в осе- и центрально-симметричных нестационарных течениях .....	132
3.3.9. Сравнение результатов измерений коэффициентов динамической вязкости материалов различными методами .....	135
Список литературы к главе 3 .....	138

---

Глава 4. Роль вязкости в различных динамических процессах ...	143
4.1. Расчетно-теоретическое исследование инерционного схождения оболочек из несжимаемого вязкопластического материала .....	145
4.1.1. Схождение цилиндрических оболочек .....	146
4.1.2. Схождение сферических оболочек .....	151
4.1.3. Результаты расчетов и их обсуждение .....	157
4.2. Экспериментально-расчетное исследование схождения цилиндрических оболочек, разгоняемых продуктами взрыва, с учетом диссипативных процессов ....	163
4.2.1. Динамика схождения оболочек .....	163
4.2.2. Симметрия и устойчивость схождения оболочек ..	173
4.3. Экспериментально-расчетное исследование всестороннего сжатия и растяжения при взрывном нагружении шаров с учетом диссипативных процессов .....	188
4.4. Оценка параметров вязкопластического механизма образования «горячих точек» в пористом материале за фронтом УВ .....	198
4.5. Кинетическая модель пластического разрушения с учетом диссипативных процессов .....	207
4.6. Моделирование струйных течений при выходе УВ на профилированную свободную поверхность .....	219
4.7. Роль вязкости материала оболочек в проблеме газодинамического термоядерного синтеза .....	231
Список литературы к главе 4 .....	233

3. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсных нагружениях. Киев: Наукова думка, 1991.

4. Баженов А. В., Глушак Б. Л., Новиков С. А. Сопротивление материалов пластической деформации при высокоскоростном деформировании в ударных волнах. М.: ВНИИЭФ, 1990.

5. Сахаров А. Д., Зайдель Р. М., Минеев В. Н., Олейник В. Г. // Докл. АН СССР. 1964. Т. 159, № 4. С. 1019–1022.

6. Минеев В. Н., Савинов Е. В. // ЖЭТФ. 1967. Т. 52. Вып. 3. С. 629–636.

7. Огородников В. А., Садовой А. А., Тюнькин Е. С., Чулков Н. Н. // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 1. С. 5–11.

8. Матюшкин Н. И., Тришин Ю. А. // Там же. 1978. № 3. С. 99–112.

9. Прочность, разрушение и диссипативные потери при интенсивных ударно-волновых нагрузках / Под ред. А. А. Садовой, С. В. Михайлова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009.

10. Огородников В. А., Садовой А. А., Софронов В. Н., Тюнькин Е. С. // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1993. Вып. 3. С. 97–101.

11. Огородников В. А., Тюнькин Е. С., Иванов А. Г. // ПМТФ. 1995. № 3. С. 134–140.

12. Иванов А. Г., Лавровский Ю. Д., Огородников В. А. // Там же. 1992. № 5. С. 116–119.

13. Иванов А. Г., Огородников В. А., Тюнькин Е. С. // Там же. 1992. № 6. С. 112–115.

14. Садовой А. А., Чулков Н. М. // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1982. Вып. 3. С. 32–37.

15. Садовой А. А., Чулков Н. М. // Там же. 1986. Вып. 2. С. 50–58.

16. Садовой А. А. // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1988. Вып. 1. С. 19–22.

17. Огородников В. А., Садовой А. А., Софронов В. Н. // ФГВ. 1998. Т. 34, № 1. С. 96–101.

18. Садовой А. А., Козырев А. А., Чулков Н. М. // Химическая физика. 1987. Т. 7, № 1. С. 104–108.
19. Огородников В. А., Садовой А. А., Софронов В. Н. и др. // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2001. Вып. 2. С. 35–40.
20. Огородников В. А., Михайлов А. Л., Романов А. В. и др. // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 1. С. 16–23.
21. Ильюшин А. А., Огибалов П. М. Уругопластическая деформация полых цилиндров. М.: МГУ, 1960.
22. Забабахин Е. И., Забабахин И. Е. Явления неограниченной кумуляции. М.: Наука, 1988.
23. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969.
24. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М.: Гостехтеоретиздат, 1953.
25. Гришаенко А. И., Данильченко Б. В., Петушков В. Г. // Proc. 10 Intern. Conf. «High energy rate fabrication». 18–22 September 1989. Ljbljana. Yugoslavia. P. 699–700.
26. Гульбин В. Н., Коробков С. А. // Там же. P. 784–794.
27. Gilmon J. // J. Appl. Mech. 1968. Vol. 21, N 8. P. 727–783.
28. Фонин В. М. Хакимов Э. М. // ПМТФ. 1979. № 5. С. 114–125.
29. Годунов С. К. Элементы механики сплошной среды. М.: Наука, 1978.
30. Steinberg D. J., Lund C. M. // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 65(4). P. 1528–1533.
31. Писаренко Г. С., Петушков В. Г., Степанов Г. В., Фот Н. А. // Проблемы прочности. 1970. № 7. С. 3–8.
32. Дунин С. З., Сурков В. В. // ПМТФ. 1982. № 1. С. 131–142.
33. Аттетков А. В., Селиванов В. В., Соловьев В. С. // Там же. 1989. № 3. С. 128–132.
34. Зубарев В. Н., Телегин Г. С., Жерноклетов М. В. // Там же. 1969. № 4. С. 127–132.
35. Дерibas А. А. Физика прочности и сварка взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.

36. Борисович Б. Н., Сабельников В. П., Солодянин С. Н. // Импульсная обработка металлов давлением. 1981. Вып. 9. С. 75–82.
37. Иванов А. Г., Огородников В. А., Карпенко Г. Я. и др. // ПМТФ. 1994. Т. 33, № 4. С. 163–167.
38. Taylor G. I. // Proc. Roy. Soc. 1950. Vol. 201, N 1065.
39. Друккер Д. Механика деформируемых твердых тел. Направления развития. М.: Мир, 1983.
40. Низовцев П. Н., Раевский В. А. // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1991. Вып. 3. С. 11–17.
41. Огородников В. А., Боровкова Е. Ю., Ерунов С. В. // ФГВ. 2004. Т. 40, № 5. С. 109–117.
42. Бахрах С. М., Ковалев Н. П., Надыкто Б. А. и др. // Докл. АН СССР. 1974. Т. 215, № 5. С. 1090–1093.
43. Зельдович В. И., Литвинов Б. В., Пурыгин Н. П. и др. // Там же. 1995. Т. 343, № 5. С. 621–624.
44. Урлин В. Д. Свойства конденсированных веществ при высоких давлениях и температурах. Арзамас-16: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1992. С. 377–384.
45. Teuler F. R., Butcher V. M. // Intern. J. Fract. Mech. 1968. Vol. 4. P. 431–439.
46. Козлов Е. А., Тучин Ю. Н., Литвинов Б. В. и др. // Химическая физика. 1995. Т. 14, № 1. С. 108–118.
47. Минеев В. Н., Фунтиков А. Н. // УФН. 2004. Т. 174, № 7. С. 727–742.
48. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1963. С. 555.
49. Дунин С. З., Сурков В. В. // Прикладная математика и механика. 1979. Вып. 3. Т. 43. С. 511.
50. Хусаинов Б. А., Борисов А. А., Ермолаев Б. С. и др. // Матер. II Всес. совещания по детонации. Вып. II. Черноголовка, 1981. С. 15.
51. Hayes D. V. Eighth Intern. Colloq. on Gasdynamics of Explosives and Reactive Systems. Minsk, 1981. P. 27.

52. Аттетков А. В., Власова А. Н., Селиванов В. В. и др. // ПМТФ. 1984. № 2. С. 128.
53. Клименко Ю. В., Демин А. Н., Козырева И. Ю. // Тез. докл. I Всес. симпозиума по макроскопич. кинетике и хим. газодинамике. Черноголовка, 1984. С. 30.
54. Kim K., Sohn C. H. // The Eighth. Symp. of Detonation. Albuquerque, 1985. Vol. 2. P. 641.
55. Забабахин Е. И. Механика в СССР за 50 лет. М.: Наука, 1970. С. 313.
56. Butcher V. M., Carroll M. M., Holt A. C. // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45, N 9. P. 3864.
57. Баканова А. А., Дудолодов И. Л., Сутулов Ю. Н. // ПМТФ. 1974. № 2. С. 117–122.
58. Огородников В. А., Кулаков Е. В., Ерунов С. В. и др. // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2007. Вып. 2–3.
59. Наймарк О. Б., Беляев В. В. // ФГВ. 1989. № 4. С. 115–123.
60. Глушак Б. Л., Трунин И. Р., Новиков С. А., Рузанов А. И. Фракталы в прикладной физике / Под ред. А. Е. Дубинова. Арзамас-16: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1995. С. 59–122.
61. Cochran S., Banner D. // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48, N 7. P. 2729–2737.
62. Seaman L., Curran D., Shockey D. // Ibid. 1976. Vol. 47, N 11. P. 48–4826.
63. Яглом И. М. Проблема тринадцати шаров. Киев: Наукова думка, 1975.
64. Подурец М. А. Термодинамическая модель пористого тела // Математическое моделирование. 1996. № 2. С. 2–29.
65. Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. И. и др. // ФГВ. 1995. № 6. С. 130–139.
66. Диваков А. К., Мещеряков Ю. И., Фадеенко Л. П. // ЖТФ. 1983. Т. 53, № 10. С. 2050–2054.
67. Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л. и др. // ФГВ. 1998. Т. 34, № 6. С. 103–107.
68. Огородников В. А., Иванов А. Г., Крюков Н. И. // Там же. 1999. Т. 35, № 5. С. 122–126.

69. Иванов А. Г., Кочкин Л. И., Огородников В. А. и др. // Там же. 1990. № 5. С. 127–129.
70. Тришин Ю. А. Физика кумулятивных процессов. Новосибирск: Ин-т гидродинамики, 2005.
71. Дреннов О. Б., Михайлов А. Л., Огородников В. А. // ПМТФ. 2000. № 2. С. 171–176.
72. Соколов С. С. // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 4. С. 62–80.
73. Соколов С. С., Садовой А. А., Чайка Т. И. // Там же. Вып. 3. С. 54–61.
74. Михайлов А. Л., Огородников В. А., Хохлов Н. П. и др. // Химическая физика. 2001. № 8. С. 73–79.
75. Попов Н. А., Щербаков В. А., Минеев В. Н. и др. // УФН. 2008. Т. 178, № 10. С. 1087–1094.
76. Козырев А. С. Газодинамический термоядерный синтез. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.
77. Мешков Е. Е. // Механика жидкости и газа. 1969. № 5. С. 151–158.
78. Михайлов А. Л. // ФГВ. 1979. № 2. С. 151–158.
79. Огородников В. А., Иванов А. Г., Крюков Н. И. // Там же. 1999. Т. 35, № 5. С. 122–126.
80. Огородников В. А., Михайлов А. Л., Бурцев В. В. и др. // ЖЭТФ. 2009. Т. 136. Вып. 3. С. 1–6.
81. Минеев В. Н., Фунтиков А. Н. // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44, № 6. С. 943–950.

Монография

**Огородников** Владимир Александрович

**Вязкость и ее роль в динамических процессах**

Редактор *Л. В. Мазан*

Корректор *Н. Ю. Костюничева*

Компьютерная подготовка оригинала-макета *С. Н. Фролова*

---

Подписано в печать 24.08.2012    Формат 60×84/16

Печать офсетная. Усл. печ. л. ~ 14    Уч. изд. л. ~ 12

Тираж 200 экз.    Зак. тип. 681-2012

---

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
607190, г. Саров Нижегородской обл.