

НЕФТЕГАЗОВЫЙ ИНЖИНИРИНГ

В. Г. ЛЕВИЧ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА



НЕФТЕГАЗОВЫЙ ИНЖИНИРИНГ

В. Г. ЛЕВИЧ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА

Издание третье, исправленное
и дополненное



УДК 541.12:532.5

ББК 22.253.31

Л372

Левич В. Г.

Физико-химическая гидродинамика. — Изд. 3-е, испр. и доп. — М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2016. — 708 с.

Данная книга основана на предыдущем издании, опубликованном в 1959 году (Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: ГИФМЛ, 1959. 700 с.). В настоящем издании устранены опечатки, произведена адаптация текста согласно правилам современного русского языка и действующим метрическим нормам; в частности, исправлены неточности, касающиеся сокращенных обозначений некоторых единиц измерения.

Физико-химическая гидродинамика как направление исследований изучает круг вопросов, связанных как с влиянием движения жидкостей на химические или физико-химические превращения, так и с влиянием физико-химических факторов на движение жидкостей.

Книга предназначена для научных работников и аспирантов (физиков, физико-химиков и химиков), а также студентов старших курсов, специализирующихся в области теоретической физики и физической химии.

ISBN 978-5-4344-0386-3

© Е. В. Левич, А. В. Левич (наследники), 2016

© Ижевский институт компьютерных исследований, 2016



<http://shop.rcd.ru>

<http://ics.org.ru>

Оглавление

О профессоре В. Г. Левиче	ix
От редакционного совета серии	xvii
Предисловие ко второму изданию	xix
Из предисловия к первому изданию	xx
ГЛАВА I. Введение	1
§ 1. Уравнения гидродинамики	1
§ 2. Подобие гидродинамических явлений	6
§ 3. Движение жидкости при больших числах Рейнольдса. Пограничный слой	8
§ 4. Турбулентное движение жидкости	20
§ 5. Обтекание тела, имеющего значительную кривизну	33
Литература	36
ГЛАВА II. Конвективная диффузия в жидкостях	37
§ 6. Диффузионная кинетика	37
§ 7. Общие данные о диффузионной кинетике в жидкостях	38
§ 8. Конвективная диффузия в жидкостях	43
§ 9. Граничные условия для уравнения конвективной диффузии	51
§ 10. Общая теория конвективной диффузии в жидкостях	54
§ 11. Решение уравнения конвективной диффузии к поверхности вращающегося диска	58
§ 12. Смешанная кинетика на поверхности вращающегося диска. Метод равнодоступной поверхности	69
§ 13. Сведение уравнения конвективной диффузии к уравнению типа уравнения теплопроводности	75
§ 14. Диффузия к падающей твердой частице	77
§ 15. Диффузионный поток на поверхность обтекаемой пластинки	84
§ 16. Аналогия между конвективной диффузией и поверхностным трением	88
§ 17. Решение уравнения конвективной диффузии для пластинки при смешанной кинетике	90
§ 18. Релаксация диффузионного процесса	98
§ 19. Моделирование гетерогенных химических реакций	105

§ 20. Внутренняя задача: диффузия в ламинарном потоке, текущем в трубе	108
§ 21. Распределение вещества, введенного в текущий поток жидкости .	113
§ 22. Конвективная диффузия в двойной жидкой системе в критической области	116
§ 23. Диффузионный поток при естественной конвекции. Случай вертикальной пластинки	123
Литература	132
ГЛАВА III. Диффузионная кинетика при турбулентном течении жидкости	135
§ 24. Общие закономерности переноса субстанций в турбулентном потоке	135
§ 25. Диффузионный поток	140
§ 26. Диффузионный поток на внутренность трубы и на поверхность пластинки	150
§ 27. Диффузионный поток на вращающийся диск	153
§ 28. Диффузионный поток к поверхности тела необтекаемой формы .	155
§ 29. Диффузионный поток на шероховатую поверхность при ламинарном течении. Растворение тела вблизи угла	158
§ 30. Диффузионный поток на шероховатую поверхность при турбулентном течении вблизи поверхности	162
§ 31. Об аналогии между конвективной диффузией и поверхностным трением при турбулентном режиме течения жидкости	167
§ 32. Движение частиц, взвешенных в турбулентном потоке	170
§ 33. Диффузия к частицам, взвешенным в турбулентном потоке. Элементарный акт процесса экстрагирования	172
Литература	179
ГЛАВА IV. Теплопередача в жидкостях	181
§ 34. Теплопередача в жидкостях	181
§ 35. Простейшие задачи конвективной теплопередачи	185
§ 36. Теплопередача в турбулентном потоке	191
§ 37. Теория конвективной теплопередачи в жидких металлах	193
§ 38. Общая интерполяционная формула для потока тепла в жидкости при любых значениях числа Прандтля	200
Литература	202
ГЛАВА V. Некоторые вопросы теории коагуляции дисперсных систем в движущихся жидкостях и газах	203
§ 39. Теория Смолуховского	203
§ 40. Градиентная коагуляция	207
§ 41. Теория коагуляции коллоидов в турбулентном потоке жидкости .	209

§ 42. Второй механизм коагуляции частиц аэрозоля в турбулентном потоке	215
§ 43. Осаждение аэрозолей и коллоидов	217
Литература	225
ГЛАВА VI. Прохождение токов через растворы электролитов	227
§ 44. Квазиравновесное состояние электролитической ячейки	227
§ 45. Ток в электролитической ячейке	232
§ 46. Концентрационное перенапряжение	238
§ 47. Химическое перенапряжение. Перенапряжение водорода	246
§ 48. Сравнение различных факторов, определяющих величину тока в ячейке	253
§ 49. Распределение тока в электролитической ячейке в отсутствие концентрационного перенапряжения	256
§ 50. Прохождение тока через размещаемый электролит	273
§ 51. Ток в бинарном электролите	275
§ 52. Теория дискового электрода в бинарном электролите	280
§ 53. Ток в присутствии постороннего электролита	286
§ 54. Диффузионный ток на поверхность дискового электрода и пластины при наличии постороннего электролита	290
§ 55. Сравнение теории с опытом	294
§ 56. Количественная проверка теории. Ламинарный режим движения жидкости	299
§ 57. Количественная проверка теории. Турбулентный режим движения жидкости	310
§ 58. Приложения теории конвективной диффузии к решению электрохимических задач	316
§ 59. Растворение однородных металлов в кислотах. Растворение включений	329
§ 60. Применение вращающегося дискового электрода к изучению кинетических и каталитических процессов в электрохимии	337
§ 61. Нестационарная конвективная диффузия. Время установления стационарного режима	349
§ 62. Случай заданной концентрации у поверхности	350
§ 63. Установление режима при заданной плотности тока	355
Литература	359
ГЛАВА VII. Капиллярное движение	363
§ 64. Поверхностный слой	363
§ 65. Условия равновесия между двумя неподвижными жидкими фазами	364
§ 66. Капиллярное движение	371
§ 67. Скорость капиллярного поднятия	373

§ 68. Термокапиллярное движение	374
§ 69. Влияние поверхностно-активных веществ (ПАВ) на движение жидкости	380
Литература	384
ГЛАВА VIII. Движение капель и пузырьков в жидкой среде	385
§ 70. Движение капель жидкости в жидких средах	385
§ 71. Сравнение формулы Рыбчинского – Адамара с опытными данными	391
§ 72. Диффузионный поток на движущуюся каплю	393
§ 73. Падение капель в жидких средах в присутствии поверхностно-активных веществ	398
§ 74. Падение капли в присутствии поверхностно-активного вещества, скорость подачи которого определяется адсорбцией	402
§ 75. Падение капли в присутствии поверхностно-активных веществ, скорость подачи которых определяется процессами объемной и поверхностной диффузии	405
§ 76. Сопоставление различных теорий	409
§ 77. Сравнение различных механизмов торможения	412
§ 78. Границы применимости теории	415
§ 79. Движение капель больших размеров	418
§ 80. Движение и растворение газовых пузырьков в жидкости	421
§ 81. Движение весьма малых пузырьков	423
§ 82. Движение пузырьков умеренных размеров	425
§ 83. Экспериментальная проверка теоретической формулы для скорости движения пузырька в жидкой среде	437
§ 84. Движение пузырьков больших размеров	439
§ 85. Дробление пузырьков	442
§ 86. Дробление капель	443
§ 87. Дробление капель в турбулентном потоке жидкости	446
§ 88. Дробление капель в турбулентном потоке жидкости у стенок	449
§ 89. Дробление капель в турбулентном потоке газа и дробление пузырьков	453
§ 90. Растворение пузырьков газа. Теория элементарного акта процесса барботажа	454
§ 91. Вычисление скорости растворения газа из пузырьков	455
§ 92. Растворение газового пузырька, взвешенного в турбулентном потоке жидкости	458
Литература	459
ГЛАВА IX. Движение частиц в растворах электролитов	461
§ 93. Электрокинетические явления	461

§ 94. Электрофоретическое движение у плоской поверхности (электроосмос)	462
§ 95. Электрофорез твердых диэлектрических частиц	464
§ 96. Электрофорез идеально поляризующихся металлических частиц. Расчет сил для случая диффузного двойного слоя	470
§ 97. Электрофорез идеально поляризующихся металлических частиц. Расчет сил для случая гельмгольцевского двойного слоя	473
§ 98. Электрокапиллярные движения ртутных капель в электрическом поле	479
§ 99. Движение жидких металлических капель в электрическом поле	481
§ 100. Движение неидеально поляризующихся капель в электрическом поле	494
§ 101. Сравнение теории с опытом	497
§ 102. Падение ртутных капель и капель эмульсий в поле тяжести	500
§ 103. Потенциалы падающих капель	507
§ 104. Влияние магнитного поля на падение ртутных капель	513
Литература	518
ГЛАВА X. Теория полярографического метода	519
§ 105. Полярографический метод	519
§ 106. Режим движения жидкости в висящей ртутной капле	521
§ 107. Диффузионный ток на капельный ртутный электрод при наличии добавки постороннего электролита. Случай обратимых реакций	525
§ 108. Поправки к формуле для диффузионного тока на капельный электрод: учет кривизны поверхности и неравномерности вытекания жидкости	532
§ 109. Диффузионный ток на капельный ртутный электрод при наличии добавки постороннего электролита. Случай необратимых процессов	536
§ 110. Ток на капельный ртутный электрод в бинарном растворе электролита	543
§ 111. Полярографические максимумы	548
§ 112. Полярографические максимумы 2-го рода	550
§ 113. Полярографические максимумы 1-го рода	554
§ 114. Максимумы на положительной и отрицательной ветвях электрокапиллярной кривой	565
§ 115. Подавление полярографических максимумов и некоторые практические приложения	569
Литература	576
ГЛАВА XI. Волны на поверхности жидкости	579
§ 116. Волны на поверхности идеальной жидкости	579
§ 117. Волны на поверхности вязкой жидкости	587

§ 118. Волновое движение на поверхности маловязкой жидкости	591
§ 119. Волновое движение на поверхности весьма вязкой жидкости	595
§ 120. Влияние поверхностно-активных веществ на волновое движение жидкости	596
§ 121. Гашение капиллярных волн поверхностно-активными веществами	598
§ 122. Гашение волн растворимыми поверхностно-активными веществами	608
§ 123. Распад жидкой струи при малых скоростях движения. Случай симметричных деформаций	614
§ 124. Распад жидкой струи при малых скоростях движения. Случай произвольных деформаций	622
§ 125. Распад струи при больших скоростях. Распыл	626
§ 126. Распад струи при больших скоростях. Случай длинных волн	633
§ 127. Распад массы жидкости произвольной формы. Заключительные замечания	637
§ 128. Капиллярные волны на поверхности капли	640
§ 129. Возбуждение волн на плоской поверхности жидкости	642
§ 130. Возбуждение ветровых волн большой амплитуды на поверхности глубокой жидкости и затухание их из-за турбулентного трения	646
Литература	654
ГЛАВА XII. Движение и диффузия в тонких пленках жидкости	655
§ 131. Течение тонких пленок жидкости	655
§ 132. Метод «сдувания» тонких пленок жидкости	658
§ 133. Толщина пленки, остающейся на поверхности тела, извлекаемого из неподвижной жидкости	660
§ 134. Волновое течение тонких слоев жидкости	670
§ 135. Турбулентное движение в пленке	676
§ 136. Растворение газа на границе раздела «жидкость – газ» в условиях пленочного течения. Элементарный акт скрубберного процесса	679
Литература	685