

М. В. КРАВЦОВ

ГИДРАВЛИКА ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Под редакцией
кандидата технических наук
П. В. Шведовского

МИНСК «НАУКА И ТЕХНИКА» 1980

532

К77

УДК 532.5.013 : 532.546 : 628.016.06

Кравцов М. В. **Гидравлика зернистых материалов.** Мн., «Наука и техника», 1980, 168 с.

В книге впервые в отечественной литературе с единой точки зрения изложены обобщенные результаты исследований закономерностей: движения одиночных твердых, жидких и газообразных тел в жидкостях; осаждения взвесей и взвешивания зернистых слоев; фильтрации однородных жидкостей в плотных зернистых средах; напорного транспорта воды и гидросмесей по трубам круглого поперечного сечения; гидротранспорта взвесей в открытых каналах и руслах. Установленные закономерности позволяют применять более обоснованные и точные методы расчетов сооружений, установок и аппаратов по реализации процессов осаждения, взвешивания зернистых слоев, фильтрации жидкостей в плотных зернистых средах и гидротранспорта.

Предназначена для работников проектных и научно-исследовательских институтов, занятых в областях водоснабжения, канализации и гидротехники, а также может быть полезна аспирантам и студентам вузов соответствующих специальностей.

Таблиц 14. Иллюстраций 41. Библиография — 97 названий.

Рецензенты: Г. В. Мишурова, кандидат технических наук,
М. И. Поляков, инженер,
А. А. Василевский, инженер

30211—026
К—————90—80 2105000000
М316—80

© Издательство «Наука и техника», 1980.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Решение многих задач связано с существованием и распадом многофазных систем. Многофазная система состоит из сплошной среды и дискретной фазы, включающей один или несколько компонентов. Если сплошная среда—жидкость, то дискретная фаза может состоять из твердых частиц, пузырьков газа или капель жидкостей, не смешивающихся с жидкой средой.

Важное значение имеют решения задач, связанных с движением зернистых материалов в жидкостях и жидкостей в пористых средах при расчетах процессов осаждения взвесей и взвешивания зернистых слоев, фильтрации жидкостей в плотных зернистых средах и гидротранспорта зернистых материалов. Указанные процессы реализуются в различного рода отстойниках, установках со взвешенными (кипящими, псевдооживленными) слоями, фильтрах и пористых средах, установках по гидротранспорту и т. д., применяемых в областях химической технологии, водоснабжения и канализации, гидротехники. Естественно, что расчеты аппаратов, установок и сооружений, в которых протекают процессы осаждения и взвешивания зернистых слоев, фильтрации и гидротранспорта зернистых материалов, могут быть обоснованы только в том случае, когда будут установлены общие закономерности протекания этих процессов. В настоящее время такие закономерности не выяснены, хотя интерес к вопросам взаимодействия компонентов многофазных (в основном двухфазных) систем непрерывно растет в связи с широким кругом новых физических и технических задач. Решение этих задач связано с более общей проблемой — гидравлическими сопротивлениями при взаимодействии жидкой среды с дискретной фазой. Работы Галилея и Ньютона положили начало изучению этой проблемы, а в последующем ей было посвящено

очень много работ. На всех этапах развития проблемы гидравлических сопротивлений при взаимодействии зернистых частиц с вязкой средой было важно не только получать новые решения, но и производить анализ и обобщение имеющихся многочисленных результатов исследований в различных областях науки и техники.

В данной работе сделана попытка выявить основные направления и тенденции развития гидравлики зернистых материалов и названы наиболее важные результаты научных исследований. Приводятся новые решения задач, полученные автором на основе разработанных расчетных моделей явлений свободного и стесненного движения одиночного твердого, жидкого и газообразного тел в жидкой среде, осаждения взвесей и взвешивания зернистых слоев, фильтрации однородных жидкостей в пористых зернистых средах и гидротранспорта зернистых материалов. Для экспериментального обоснования полученных решений привлечен обширный опытный материал различных исследователей. Однако для широкого круга затронутых в работе вопросов его недостаточно и в дальнейшем потребуется значительно расширить экспериментальные исследования с целью уточнения и более широкого обоснования расчетных формул. На основе полученных автором расчетных формул разработаны методики расчета речных отстойников, процессов фильтрации однородных жидкостей в плотных и деформированных зернистых средах, напорного транспорта воды и гидросмесей по цилиндрическим стальным трубам круглого поперечного сечения.

Результаты приведенных в работе исследований находят применение в практике гидротехнического и водохозяйственного строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Менделеев Д. И. О сопротивлении жидкостей. Соч., т. 7. Л.—М., Изд-во АН СССР, 1946.
2. Ньютон И. Математические начала натуральной философии. Собр. трудов А. Н. Крылова, т. 7. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1936.
3. Stokes G. G. On the effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion Pendulum. Trans. Camb. Phil. Soc., 8, 9, 1851.
4. Кочин Н. Е. и др. Теоретическая гидромеханика, т. II. М., Физматгиз, 1963.
5. Zeleny, M. Kechau. Endgeschwindigkeit. Physik Zeitschr., v. XI, 1910.
6. Pruppacher H. P., Steinberger E. H. An Experimental Determination of the Drag on a Sphere at Low Reynolds Numbers. J. Appl. Phys., 39, № 9, 4129, 1968.
7. Oseen C. W. Über die Stokessche Formel und über eine verwandte Aufgabe in der Hydrodynamik, Arkiv für Mat., Astr. och Fysik, 6(1910), № 29; 7(1911), № 1.
8. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. М.—Л., ИЛ, 1951.
9. Седов Л. И. Механика сплошной среды, т. 2. М., Наука, 1970.
10. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. Изд. 3-е. Наука, М., 1970.
11. Гинзбург И. П. Теория сопротивления и теплопередачи. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1970.
12. Allen H. C. The Motion of a sphere in a viscous Fluid. «Philosophical Magazine», L., 1900.
13. Rittinger, Ritter von P. Lehrbuch der Aufbereitungskunde Ernst. und Korn. Berlin, 1867.
14. Goldstein S. The steady Flow of viscous Fluids Past a Fixed spherical Oestacle at Small Reynolds Numbers. Proc. roy. Soc., Ser. A, 123, 225, 1929.
15. Великанов М. А., Зегжда А. П. Равномерное движение шара в жидкости.—Изв. научно-мелиорационного ин-та, вып. XIX, 1929.
16. Олевский В. Л. О свободном падении частиц в жидкой среде.— В кн.: Гравитационные методы обогащения. Механообработка, вып. 88. М., Металлургиздат, 1953.
17. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., Машиностроение, 1975.
18. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., ИЛ, 1956.
19. Achenbach E. Experiments on the flow past spheres. J. Fluid Mech., 54, № 3, 565.
20. Кравцов М. В. Сопротивление свободному установившемуся движению сферы в вязкой среде.— ИФЖ, т. XV, № 3, 1968.

21. *Pannel I. R.* Experiments on the resistance of sphere. «Rep.», № 190, АСА (1915), 1916.
22. *Романков П. Г.* Гидравлические процессы химической технологии. М., Госхимиздат, 1948.
23. *Фукс Н. А.* Механика аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1955.
24. *Лященко П. В.* Гравитационные методы обогащения. М., Гостоптехиздат, 1935 (1940).
25. *Верецагин И. П.* Сопротивление среды движению частицы.— Тр. Моск. энерг. ин-та, вып. 70. М., 1968.
26. *Благов И. С. и др.* Гравитационные процессы обогащения. М., Госгортехиздат, 1962.
27. *Климентов А. А.* О скорости падения твердых частиц в неподвижной и неограниченной жидкостях.— В кн.: Гидромеханизация земляных и открытых горных работ. М., 1968.
28. *Miller D. G.* Sedimentation (A. review of published Work). «Water and Water Engineering», February, 1964.
29. *Lapple C. E., Shepherd C. B.* Calculation of particle Trajectories. Ind. Eng. Chem., 32, № 5, 1940.
30. *Zabeltitz V.* Beitrag zur Ermittlung der Schwarmgeschwindigkeit von Kugelförmigen Körpern bei der Schwerkraftsortierung. Aufbereitungstechnik, № 3, 1968.
31. *Крацов М. В., Суворов В. В.* К вопросу седиментации частиц сферической формы.— В кн.: Водное хоз-во Белоруссии, вып. 1. Мн., Вышэйшая школа, 1971. ✓
32. Справочник химика, т. 3. М.—Л., Химия, 1965.
33. *Крацов М. В., Суворов В. В.* Сопротивление движению шаров в жидкостях при числах Re до 10^6 .— В кн.: Водное хоз-во Белоруссии, вып. 4. Мн., Вышэйшая школа, 1974. †
34. *Годен А. М.* Основы обогащения полезных ископаемых. М., Металлургиздат, 1946.
35. *Архангельский В. В.* Исследование методов механического анализа грунтов.— Изв. НИИТ, т. VII, 1935.
36. *Архангельский В. В.* Исследование методов механического анализа грунтов.— Изв. НИИТ, т. VII, 1933.
37. *Гончаров В. А.* Движение насосов. М., ОНТИ, 1938.
38. *Зегжда А. П.* Падение зерен песка и гравия в стоячей воде.— Изв. НИИ гидротехники, т. 12, 1934.
39. *Караушев А. В.* Проблемы динамики естественных водных потоков. М., Гидрометеиздат, 1960.
40. *Караушев А. В.* Речная гидравлика. Л., Гидрометеиздат, 1969.
41. *Ибад-Заде Ю. А., Нуриев И. Г.* Расчет отстойников. М., Госстройиздат, 1972.
42. *Миц Д. М., Шуберт С. А.* Гидравлика зернистых материалов. М., Изд-во МКХ РСФСР, 1955.
43. *Rybczynski W.* Bull. de Cracovie (A), (Acad. Sci., Cracovie). 1911, 40.
44. *Hadamard I.* Comp. Rend., 152, 1735, 1911.
45. *Johnson A. I., Braida Z.* Canad. and Engng., 35, 65, 1957.
46. *Krischna P. M.* а. о. J. Chem. and Engng. Data, 4, № 4, 1959.
47. *Крацов М. В.* Формула для расчета скорости равномерного движения капель в статических условиях среды.— В кн.: Водоотведение и очистка воды. Мн., Наука и техника, 1969.

48. *Kintner R. C.* Drop Phenomena Affecting Liquid Extraction. *Advances in Chem. Engineering*, v. 4, N. Y.—L., 1963.
49. *Davies J. T.* Mass-Transfer and Interfacial Phenomena. *Advances in Chem. Engineering*, v. 4, N. Y.—L., 1963.
50. *Kojima Eiichi, Akanata Takashi, Shirai Takashi.* Rissing velocity and Shape of single air bubbles in highly viscous liquids. *J. Chem. Engng. Japan*, 1, № 1, 45, 1963.
51. *Кравцов М. В., Суворов В. В.* Скорость подъема и деформации пузырьков в жидкостях.— В кн.: Водное хоз-во Белоруссии, вып. 3. Мн., Вышэйшая школа, 1973.
52. *Кравцов М. В., Суворов В. В.* Свободное неустановившееся падение шара в жидкости.— В кн.: Водное хоз-во Белоруссии, вып. 3. Мн., Вышэйшая школа, 1973.
53. *Кравцов М. В.* К вопросу моделирования процессов осаждения взвесей.— *Изв. вузов. Энергетика*, № 4, 1976.
54. *Fidleris V., Whitmore R. L.* Experimental determination of the Wall effect for spheres falling axially in cylindrical vessels. *Brit. Journal of Appl. Phys.*, 12, 1961.
55. *Кравцов М. В.* Стесненное осаждение твердых сферических частиц.— В кн.: Водное хоз-во Белоруссии, вып. 4. Мн., Вышэйшая школа, 1974.
56. *Финкей И. И.* Научные основы мокрого обогащения руд. Харьков, ОНТИ, 1932.
57. *Куприн А. И.* и др. Исследования конечной скорости падения отдельных частиц угля и породы в вертикальных трубах, заполненных водой.— В кн.: Гидроаэромеханика, вып. 5. Харьков, Изд-во Харьковского ун-та, 1967.
58. *Еркова Л. Н., Полюта Н. И.* Свободное осаждение твердых сферических частиц в жидкой среде.— *ЖПХ*, т. XXIV, вып. 5, 1956.
59. *Кутателадзе С. С., Стырикович М. А.* Гидравлика газожидкостных систем. М., Госэнергоиздат, 1958.
60. *Розенбаум Р. Б., Тодес О. М.* Исследование стесненного падения капли в вязкой жидкости.— *Уч. зап. Ленингр. горного ин-та*, 37, № 3, 1961.
61. *Хеппель Д. Ж., Бреннер Г.* Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М., Мир, 1976.
62. *Левин Б. И.* и др. Исследование процесса осаждения монодисперсных суспензий в условиях малых концентраций.— В кн.: Вопросы гидравлики открытых русел, трубопроводов и двухкомпонентных сред. Труды Моск. ин-та железнодорожного транспорта, вып. 176. М., 1963.
63. *Юфин А. П.* Гидромеханизация. М., Стройиздат, 1974.
64. *Brauer H., Kriegel E.* Kornbewegung bei der Sedimentation. *Chemie Ing. Techn.*, 38, № 3, 1966.
65. *Мицц Д. М.* О скорости стесненного падения частиц в жидкости.— *Гидротехническое строительство*, № 5, 1953.
66. *Кравцов М. В.* К гидравлическому расчету отстойников ГЭС.— *Изв. вузов. Энергетика*, № 2, 1978.
67. *Кравцов М. В.* К гидравлическому расчету движения однофазной жидкости в зернистой среде.— *Изв. вузов. Строительство и архитектура*, № 1, 1977.
68. *Яновский В. А.* Гидравлические свойства зернистых фильтрующих сред.— В кн.: Сельскохозяйственное водоснабжение и об-

воднение пастбищ. Труды Новочеркасского инженерно-мелиоративного ин-та, т. XVI, вып. 4. Новочеркасск, 1975.

69. *Миц Д. М.* Теоретические основы технологии очистки вод. М., Госстройиздат, 1964.

70. *Лейбензон Л. С.* Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М., Гостоптехиздат, 1947.

71. *Ломизе Г. М.* Фильтрация в трещиноватых породах. М., Госэнергоиздат, 1951.

72. *Аравин В. И., Носова О. Н.* Натурные исследования фильтрации (теоретические основы). Л., Энергия, 1964.

73. *Павловский Н. Н.* Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями. Собр. соч., т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1956.

74. *Гагаев Б. В.* Закономерности сопротивления при равномерной турбулентной фильтрации.— В кн.: Гидротехника. Труды ВНИИГиМ. М., 1972.

75. *Силин Н. А., Коберник С. Г.* Режимы работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов. Киев, Изд-во АН УССР, 1961.

76. *Силин Н. А.* и др. Гидротранспорт. Вопросы гидравлики. Киев, Наукова думка, 1971.

77. *Карасик В. И., Асауленко И. А.* Напорный гидротранспорт песчаных материалов. Киев, Наукова думка, 1966.

78. *Смолдырев А. Е., Сафонов Ю. К.* Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей. М., Машиностроение, 1973.

79. *Карасик В. М.* и др. Интенсификация гидротранспорта продуктов и отходов обогащения горнообогатительных комбинатов. Киев, Наукова думка, 1976.

80. *Смолдырев А. Е.* Трубопроводный транспорт (элементы теории и основы расчета). М., Недра, 1970.

81. *Рошупкин Д. В.* Определение потерь напора на трение при гидротранспорте гравийных, песчаных и песчано-гравийных грунтов.— Изв. вузов. Строительство и архитектура, № 8, 1974.

82. *Tarjan Ivan, Debreczeni Elemer.* Bestimmung der Transportgeschwindigkeit bei hydraulischem Feststofftransport für Pumpen mit verschiedenen Kennlinien. Chemie Technik, 28, № 7, 1976, 421.

83. *Альтуль А. Д., Войтинская Ю. А.* О критической скорости взвешенного потока в напорных трубопроводах.— В кн.: Вопросы гидравлики, № 124. М., МИСИ, 1974.

84. Инструкция по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта грунтов. П. 59-72. Л., Энергия, 1972.

85. *Силин Н. А., Коберник С. Г.* Режимы работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов. Киев, Изд-во АН УССР, 1962.

86. *Коротков В. Е.* Некоторые результаты исследования неразмывающих скоростей для несвязных грунтов.— В кн.: Промышленная теплотехника и гидравлика, вып. 2. Чебоксары, Чувашский гос. ун-т, 1976.

87. *Киселев П. Г.* и др. Справочник по гидравлическим расчетам. М., Энергия, 1972.

88. *Яковлев С. В., Калицун В. И.* Механическая очистка сточных вод. М., Госстройиздат, 1972.

89. *Чугаев Р. Р.* Гидравлика. Л., Энергия, 1971.

90. *Ходанович И. Е., Одишария Г. Э.* Обобщающая зависимость для коэффициента гидравлического сопротивления.— В кн.: Транспорт природных газов, вып. 29/37. М., Недра, 1967.

91. *Шевелев Ф. А.* Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах. М., Госстройиздат, 1963.

92. *Альтшуль А. Д.* Гидравлические потери на трение в трубопроводах. М., Госэнергоиздат, 1963.

93. *Meier O. E.* Hydraulische Untersuchungen. Annalen der Physik und Chemie, Jubelband, J. C. Poggendorf. Leipzig, 1874.

94. *Блантер М. Е.* Методика исследований металлов и обработка опытных данных. М., Металлургиздат, 1952.

95. *Румишинский Л. З.* Математическая обработка результатов эксперимента. М., Наука, 1971.

96. *Бродский А. Д., Кан В. Л.* Краткий справочник по математической обработке результатов измерений. М., Стандартгиз, 1960.

97. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М., Наука, 1974.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
ГЛАВА 1. СВОБОДНОЕ ДВИЖЕНИЕ ОДИНОЧНОГО ТЕЛА В СПОКОЙНОЙ ВЯЗКОЙ СРЕДЕ	5
1.1. Стационарное движение твердого тела (5). 1.2. Стационарное движение частиц зернистых материалов (42). 1.3. Стационарное движение капель и пузырьков сферической формы (47). 1.4. Нестационарное движение тела (62).	
ГЛАВА 2. СТЕСНЕННОЕ СТЕНКАМИ СОСУДА СТАЦИОНАРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ОДИНОЧНОГО ТЕЛА В СПОКОЙНОЙ ВЯЗКОЙ СРЕДЕ	66
2.1. Движение твердого шара (66). 2.2. Движение частиц зернистых материалов (77).	
ГЛАВА 3. ФИЛЬТРАЦИЯ ОДНОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ДЕ-ФОРМИРОВАННЫХ И ПЛОТНЫХ ЗЕРНИСТЫХ СРЕДАХ	81
3.1. Осаждение взвесей и взвешивание зернистых слоев (81). 3.2. Фильтрация в плотных зернистых средах (94). 3.3. Обобщение закономерностей стесненного течения жидкостей (107).	
ГЛАВА 4. ГИДРОТРАНСПОРТ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ	109
4.1. Напорный гидротранспорт. Критические скорости. Потери напора (109). 4.2. Безнапорный гидротранспорт. Неразмывающие и незаилающие скорости. Расчет отстойников (129). 4.3. К оценке точности истинного значения измеряемой величины (134).	
Литература	141
Приложение	146

МАРАТ ВАСИЛЬЕВИЧ КРАВЦОВ ГИДРАВЛИКА ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Редактор Г. В. М а л а х о в а. Обложка В. В. М а л е н ь к о й. Художественный редактор В. А. Ж а х о в е ц. Технический редактор А. В. С к а к у н. Корректор Т. А. З а й ц е в а.

ИБ № 1026

Сдано в набор 13.08.79. Подписано в печать 16.01.80. АТ 13506. Формат 84×108^{1/32}. Бум. тип. № 1. Гарнитура литературная. Высокая печать. Печ. л. 5,25. Усл. печ. л. 8,82. Уч.-изд. л. 7,6. Тираж 1200 экз. Зак. № 1609. Цена 80 к. Издательство «Наука и техника». Минск, Ленинский проспект, 68. Типография им. Франциска (Георгия) Скорины издательства «Наука и техника» АН БССР и Государственного комитета БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Минск, Ленинский проспект, 68.