

**А.А. ХАЛАТОВ, А.А. АВРАМЕНКО, И.В. ШЕВЧУК**

**ТЕПЛООБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА  
В ПОЛЯХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ  
МАССОВЫХ СИЛ**

**Том 4**

**Инженерное и технологическое  
оборудование**

*В четырех томах*

Национальная академия наук Украины  
Институт технической теплофизики  
Киев - 2000

УДК 532.5 + УДК 536.24

**Халатов А.А., Авраменко А.А., Шевчук И.В.** Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил: В 4-х т.- Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2000. - Т. 4: Инженерное и технологическое оборудование. - 212 с.; ил. 126.

Монография представляет собой первое в мировой практике систематизированное четырехтомное издание, посвященное проблеме теплообмена и гидродинамики в полях центробежных, а также часто им сопутствующих кориолисовых и архимедовых массовых сил. Рассмотрены теоретические и экспериментальные результаты для пяти основных групп потоков (течения около криволинейных поверхностей, в криволинейных каналах, во вращающихся системах, закрученные потоки, вихревые и циклонные камеры). Приведены практические примеры использования таких потоков в теплообменных технологических процессах и аппаратах. При подготовке монографии использованы как результаты авторов, так и основные мировые достижения в этой области.

Предназначена для научных работников, специализирующихся в области теплофизики и гидродинамики, инженеров и студентов энергетических специальностей.

Ответственный редактор  
академик НАН Украины

**А.А.Долинский**

Рецензенты:  
Кафедра атомных электростанций и инженерной теплофизики НТУ «Киевский политехнический институт» (заведующий кафедрой профессор Е.Н. Письменный),  
профессор В.В. Бабенко

ISBN 5-77-02-1068-0  
ISBN 5-77-02-1064-8

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие к тому 4 .....	5
Основные обозначения к тому 4 .....	7
<b>ЧАСТЬ 7. ИНЖЕНЕРНОЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.....</b>	<b>8</b>
<b>7.1. Теплообменные аппараты и устройства .....</b>	<b>8</b>
7.1.1. Теплообменные аппараты .....	8
7.1.2. Циклонные нагревательные устройства .....	21
7.1.3. Вихревые холодильно-нагревательные устройства .....	35
7.1.4. Тепловые трубы и термосифоны.....	48
7.1.5. Сушильные камеры .....	52
7.1.6. Центробежно-барботажные аппараты .....	60
7.1.7. Вихревые аппараты с диспергированием жидкой фазы.....	66
7.1.8. Вихревые пленочные аппараты.....	71
7.1.9. Аппараты роторного типа.....	73
<b>7.2. Процессы горения.....</b>	<b>76</b>
7.2.1. Горелочные устройства и форсунки.....	76
7.2.2. Камеры сгорания газотурбинных двигателей .....	91
7.2.3. Вихревые и циклонные камеры сгорания .....	96
7.2.4. Двигатели внутреннего сгорания.....	106
<b>7.3. Очистка жидкостей и газов .....</b>	<b>111</b>
7.3.1. Гидроциклоны .....	111
7.3.2. Центробежные очистители жидкости .....	117
7.3.3. Циклоны .....	127
7.3.4. Аппараты со встречными закрученными потоками.....	131
7.3.5. Ротационные воздухоочистители и центробежные каплеуловители.....	133
7.3.6. Центробежные скруберы.....	136
<b>7.4. Промышленные и технологические аппараты.....</b>	<b>137</b>
7.4.1. Водосбросы .....	137
7.4.2. Классификаторы дисперсных материалов .....	144
7.4.3. Технологические циклоны .....	146
7.4.4. Вихревые плазменные реакторы.....	150
7.4.5. Вихревые концентраторы и генераторы аэрозолей.....	151
7.4.6. Вихревой биореактор .....	152

7.4.7. Вихревые камеры хлопьеобразования и грануляторы .....	155
7.4.8. Вихревые и роторные мельницы .....	157
7.4.9. Вихревые и центробежные увлажнители .....	160
7.4.10. Другие приложения закрученных и вращающихся потоков .....	163
<b>Приложение</b> .....	<b>166</b>
<b>Литература к части 7</b> .....	<b>197</b>

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ К ТОМУ 4

---

Четвертый том монографии «Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил» включает седьмую часть, посвященную технологическому оборудованию, в котором используются свойства потоков в полях центробежных и кориолисовых массовых сил. В отличие от предыдущих частей монографии, основным классификационным признаком является не конструктивные особенности устройства или способы создания поля центробежных и кориолисовых массовых сил (закрутка, вращение, кривизна поверхности), а область применения устройства. В некоторых случаях, когда строго придерживаться избранного классификационного подхода не представлялось возможным по причине многообразия областей применения устройства, оно классифицировалось в соответствии с основным своим применением. Значительно более редко встречающиеся приложения данного аппарата описывались в том же разделе, хотя в соответствии с избранным методом классификации их место должно было бы находиться в других разделах (например, применение вихревых холодильно-нагревательных устройств для очистки от пыли, в качестве кондиционеров и т. д.). С другой стороны, следствием метода классификации устройства в соответствии с его применением является тот факт, что один и тот же аппарат может встречаться в каждом разделе части 7 (например, циклонные камеры, являющиеся одним из уникальных устройств с точки зрения многообразия их применения).

Первый раздел части 7 включает аппараты и устройства, основным назначением которых является осуществление различных тепло- и массообменных процессов. Это собственно теплообменные аппараты (с закруткой потока в трубах, с витыми трубами, вращающиеся теплообменники), причем в подразделе 7.1.1 проведено сравнение теплогидравлической эффективности различных теплообменников. В раздел также включены циклонные устройства, используемые для нагрева и термообработки различных изделий (так называемые загруженные циклонные камеры), вихревые холодильно-нагревательные устройства (трубы и эжекторы), вращающиеся тепловые трубы и термосифоны, вихревые и циклонные сушильные камеры, центробежно-барботажные аппараты (вращающиеся и вихревые), вихревые пленочные аппараты и аппараты роторного типа.

Во втором разделе рассматриваются применения закрученных и вращающихся потоков в устройствах, осуществляющих сжигание различных видов топлива. В число таких устройств входят вихревые горелочные устройства и форсунки, камеры сгорания газотурбинных

двигателей, вихревые и циклонные камеры сгорания и двигатели внутреннего сгорания.

В третьем разделе представлены различные устройства, применяемые для очистки жидкостей и газов от твердых и каплевидных примесей – гидроциклоны, центробежные очистители жидкости, пылевые циклоны, аппараты со встречными закрученными потоками, ротационные воздухоочистители и центробежные каплеуловители, центробежные скрубберы. Следует отметить, что для очистки газов и жидкостей применяются некоторые другие устройства (вихревые трубы, центробежно-барботажные аппараты, вихревые диспергаторы), что упомянуто в разделе 7.1.

Четвертый раздел объединяет ряд других устройств и аппаратов, применяемых в различных промышленных технологических процессах. К их числу относятся водосбросы, классификаторы дисперсных материалов, технологические циклоны, вихревые плазменные реакторы, вихревые концентраторы и генераторы аэрозолей, вихревые биореакторы, вихревые камеры хлопьеобразования и грануляторы, вихревые и роторные мельницы, вихревые и центробежные увлажнители, применяемые в системах кондиционирования, кольцевые химические реакторы с вращающимся внутренним цилиндром, установки для пневмотранспорта в закрученном потоке, вихревые смесители, вихревые гидроусилители и другие устройства.

Основным подходом, использованным при охарактеризовании вышеупомянутых устройств, являлось описание конструкции и принципа работы данного аппарата. В ряде случаев приведены инженерные формулы для гидравлического расчета аппарата, коэффициентов тепло- и массообмена. Поскольку изложение материала в части 7 носит чаще всего справочный характер, то работы, в которых изложены подробные инженерные или численные методики расчета полей осредненных и турбулентных параметров в описываемых аппаратах, лишь цитируются в списках литературы.

**Авторы**

## ЛИТЕРАТУРА к части 7

---

1. *Халатов А.А.* Теория и практика закрученных потоков. - Киев: Наук. думка, 1989. - 192 с.
2. *Данилов Ю.И., Дзюбенко Б.В., Дрейцер Г.А., Ашмантас Л.А.* Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы. - М.: Машиностроение, 1986. - 200 с.
3. *Дзюбенко Б.В., Дрейцер Г.А., Ашмантас Л.-В.А.* Нестационарный теплообмен в пучках витых труб. - М.: Машиностроение, 1988. - 240 с.
4. *Мига́й В.К.* Повышение эффективности современных теплообменников. - Л.: Энергия, 1980. - 143 с.
5. *Мига́й В.К.* Моделирование теплообменного энергетического оборудования. - Л.: Энергоатомиздат: Ленингр. отделение, 1987. - 264 с.
6. *Субботин В.И., Казновский С.П., Сапанкевич А.П.* Экспериментальное исследование способов повышения критической мощности парогенерирующих труб // Изв.АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1974. - N 3. - С.162-170.
7. *Минченко Ф.П., Шварцман Г.С.* Определение оптимальной геометрии внутреннего спирального оребрения парогенерирующей трубы // Тр.ЦКТИ. - 1975. - Вып.134. - С.56-67.
8. *Грязнов Н.Д., Епифанов В.М., Иванов В.Л., Манушин Э.А.* Теплообменные устройства газотурбинных и комбинированных установок. - М.: Машиностроение, 1985. - 360 с.
9. *Sunden B., Karlsson I.* Enhancement of heat transfer in rotary heat exchangers by streamwise-corrugated flow channels // Exp. Therm and Fluid Sci. - 1991. - 4, N 3. - P.305-316.
10. *Sunden B., Karlsson I.* Enhancement of heat transfer in rotary heat exchangers // Exp. Heat Transfer, Fluid Mech., and Thermodyn. 1988: Proc. 1st World Conf., Dubrovnik, Sept. 4-9, 1988. - New York etc. - P.1375-1385.
11. *Lewandowski T.P., Yang T.-T.* A procedure to reduce the effects of variable fluid temperatures in the flow direction: application to the design of rotary regenerator // ASME Pap. - 1988. - N GT 130. - P.1-6.
12. *Ren Z., Wang S., Chen Q.* Analysis of the transient and steady-state heat transfer in rotary regenerative heat exchanger // J.Eng. Thermophys. - 1984. - 5, N 3. - P.269-274.
13. *Van den Bulck E., Mitchell J.W., Klein S.A.* Design theory for rotary heat and mass exchangers. - I. Wave analysis of rotary heat and mass exchangers with infinite transfer coefficients // Int.J. Heat and Mass Transfer. - 1985. - 28, N 8. - P.1575-1586.
14. *Van den Bulck E., Mitchell J.W., Klein S.A.* Design theory for rotary heat and mass exchangers. - II. Effectiveness-number of transfer units method for rotary heat and mass exchangers // Int.J. Heat and Mass Transfer. - 1985. - 28, N 8. - P.1587-1595.
15. *Lybaert P.* Wall-particles heat transfer in rotating heat exchangers // Int. J. Heat and Mass Transfer. - 1987. - 30, N 8. - P.1663-1672.
16. *Wes G.W.J., Drinkenburg A.A.H., Stermerding S.* Heat transfer in a horizontal rotary drum reactor // Powder Technol. - 1976. - 13. - P.185-192.
17. *Lehmberg J., Hehl M., Schugerl K.* Transverse mixing and heat transfer in horizontal rotary drums reactor // Powder Technol. - 1977. - 18. - P.149-163.
18. *Сабуров Э.Н.* Аэродинамика и конвективный теплообмен в циклонных нагревательных устройствах. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1982. - 240 с.
19. *Меркулов А.П.* Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969. - 184 с.

20. *Суслов А.Д., Иванов С.В., Мурашкин А.В., Чижиков Ю.В.* Вихревые аппараты. - М.: Машиностроение, 1985. - 256 с.
21. *Штым А.Н.* Аэродинамика циклонно-вихревых камер.- Владивосток: Изд-во Дальневосточного ун-та, 1984. - 200 с.
22. *Воронин Г.И.* Конструирование машин и агрегатов систем кондиционирования. - М.: Машиностроение, 1978. - 544 с.
23. *Дыскин Л.М.* Характеристики вихревой трубы с раскруткой холодного потока // Инж.-физ.журн. - 1989. - N 1. - С. 38-41.
24. *Кузнецов В.И.* Вихревая труба с вращающейся камерой энергетического разделения // Изв. вузов. Машиностроение. - 1988. - N 2. - С.67-72.
25. *Балалаев А.Н., Меркулов А.П., Цыбров А.Ю.* Влияние отсоса пограничного слоя на эффективность работы вихревой трубы // Изв.вузов. Авиацион. техника. - 1985.- N 1.- С.9-12.
26. *Иткин М.С., Буровников Г.А., Яблоник Р.М., Станиславский В.Я., Палей В.Я.* Разработка конструкции вихревой трубы для повышения надежности работы турбоустановки К-1000-60/1500 // Тр.ЦКТИ. - 1983. - Вып.208. - С.118-125.
27. *Baz A., Gilheany J.* Vortex-tube assisted environmental control of hyperbaric chambers // Trans ASME. J. Energy Resour. Technol. - 1988. - **110**, N 4. - P.230-236.
28. А.с. 1044904 СССР, МКИ<sup>4</sup> F25B 9/02. Вихревой холодильник/ Ю.И. Осипенко, А.А. Халатов, Р.Ш. Аюров и др. - Оpubл. 30.09.83, Бюл. N 36.
29. А.с. 1139939 СССР, МКИ<sup>4</sup> F25B 9/02. Вихревой энергоразделитель / Ю.И. Осипенко, А.А. Халатов, Р.Ш. Аюров и др. - Оpubл. 15.02.85., Бюл. N6.
30. *Rosinski M.* Proces wymiany ciepła w nakładkach zamrażających przy blokowaniu przepływu wody w przewodach // Pr.nauk.Inz.sanit. i wod. // PWarsz. - 1990. - N 8. - С.21-52.
31. *Долинский А.А., Халатов А.А., Костенко Н.В.* Тепломассообменное устройство // А.с. 1655531 А1 СССР, МКИ<sup>5</sup> ВО1Д 3/30. - Оpubл. 15.06.91, Бюл. N 22.
32. *Халатов А.А., Костенко Н.В., Кобзар С.Л., Житарь И.Н.* Установка для использования теплоты и очистки уходящих газов // А.с. 16242447 А1 СССР, МКИ<sup>5</sup>. F23 15/00.- Оpubл.30.01.91, Бюл. N4.
33. Тепловые трубы в электрических машинах / Петров В.М., Бурковский А.Н., Ковалев Е.Б. и др. Под ред. В.М. Петрова. - М.: Энергоатомизд., 1987. - 152с.
34. *Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И.* Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. - Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1987. - 282 с.
35. *Сажин Б.Е., Лукашевский Б.П., Чувпило Е.А., Фокин И.Ф., Тучнина И.В.* Однопараметрическая математическая модель гидродинамики сушильного аппарата со встречными закрученными потоками // Теорет. основы химич. технологии. -1977. - **9**, N 4. - С.633-636.
36. *Лебедев В.Я., Барулин Е.П., Кисельников В.Н.* Исследование аэродинамики тепло- и массообмена в комбинированной сушилке с вихревым слоем // Изв. вузов. Химия и хим. технология. - 1978. - **21**, N 10. - С.1545-1549.
37. *Плановский А.Н., Муштаев В.И., Ульянов В.М.* Сушка дисперсных материалов в химической промышленности. - М.:Химия, 1978. - 362 с.
38. *Сажин Б.С.* Современные методы сушки.- М.: Знание, 1973. - 63с.
39. *Ульянов В.М., Прыгунов В.Ф., Морозкина Л.П., Тимонин А.С., Муштаев В.И.* Исследование гидродинамики и тепломассообмена в пневмосушилках спирального и вихревого типов // Пром.теплотехника. - 1984. - **5**, N 4. - С.65-69.
40. *Сериков Л.А.* Удержание мелкодисперсных частиц в вихревой камере // Автореф. дис... канд.техн.наук. - Новосибирск, 1987. - 17 с.
41. *Ахунбаев А.А., Круковский О.Н., Фролов В.Ф.* Непрерывная сушка мелкодисперсных материалов в аппарате с быстровращающимся ротором и кондуктивным подводом теплоты // Тепломассообмен ММФ- 92: 2 Мин.Международ. форум, 18-22 мая, 1992. - **11**. - Минск, 1992. - С.92-95.

42. *Futagami K., Ikeda J., Ohhira K., Aoyama Y., Mizukami K.* Condensation heat transfer in a rotating horizontal cylinder with a scraper (case of thin condensate film) // *Trans. JSME. Ser. B.* - 1989. - **55**, N 516. - P.2450-2456.
43. *Бурдуков А.П., Казаков В.И.* Гидродинамика вращающегося барботажного слоя // Исследование дисперсных систем в энергохимических процессах. - Новосибирск: Изд. ИТТФ СО АН СССР, 1982. - С.20-27.
44. *Былинкин Б.С., Белов С.А., Горшенин П.А.* Основы теории вращающихся тепло- и массообменных барботажных аппаратов. - М.: Легпромиздат, 1991. - 69с.
45. *Былинкин Б.С., Горшенин П.А.* Особенности гидродинамики газового потока во вращающемся барботажном теплообменнике // Системный анализ, моделирование и оптимизация прикладных задач. - М.: Машиностроение, 1990. - С.105-110.
46. *Казаков В.И., Кормановский Д.Г.* Влияние геометрических характеристик газораспределительных устройств на гидродинамику вращающегося барботажного слоя // Процессы переноса в аппаратах энергохимических производств. - Новосибирск: Изд. ИТФ СО АН СССР, 1985. - С.125-137.
47. *Нечаев П.Г.* Гидродинамика ротационно-барботажных аппаратов // Изв. СО АН СССР. Сер. техн.н. - 1989. - N 5. - С.30-32.
48. *Нечаев П.Г.* Об особенностях брызгоуноса из ротационно-барботажных аппаратов (РБА) // Сиб. физ.-техн. журн. - 1991. - N 1. - С.86-88.
49. *Сафонов А.И., Рева Э.П., Крылов В.С., Гомонова К.В.* Массопередача на входном участке вращающегося барботажного слоя // Теорет. основы химич. технологии. - 1976. - N 4. - С.495-500.
50. *Бурдуков А.П., Казаков В.И., Крисанов А.А.* Исследование массоотдачи, лимитируемой сопротивлением в жидкой фазе в центробежно-барботажных аппаратах // Энерготехнологич. процессы и аппараты химич. производств. - Новосибирск, 1989. - С.112-119.
51. *Бурдуков А.П., Казаков В.И., Кувшинов Г.Г.* Влияние геометрических параметров решеток на скорость вращения барботажного слоя // Изв. СО АН СССР. Сер. техн.н. - N 4, вып.1. - С.32-37.
52. *Бурдуков А.П., Гольдштик М.А., Казаков В.И., Дорохов А.Р., Ли Т.В.* Структура жидкостного слоя и тепломассоперенос в вихревых аппаратах барботажного типа // Пристенные струйные потоки. - Новосибирск: Изд. ИТФ СО АН СССР, 1984. - С.66-69.
53. *Бурдуков А.П., Дорохов А.Р., Казаков В.И., Нечаева Н.В.* Теплоотдача во вращающемся барботажном слое // Изв. СО АН СССР. Сер.техн.н. - 1982. - N 3, вып. 3. - С.9-12.
54. *Казаков В.И.* Абсорбция оксидов азота в центробежно-барботажных аппаратах // Сиб. физ.-техн.-журн. - 1991. - N 3. - С.45-50.
55. *Борисов И.И., Халатов А.А., Титова Т.Г., Шевцов С.В.* Гидродинамика вихревых барботажных аппаратов // Пром.теплотехника. - 1994. - **16**, N1. - С.28-33.
56. *Кроковный П.М., Дудченко В.К., Грицан В.И.* Использование центробежно-барботажного аппарата в процессах получения формальдегида // Процессы переноса в аппаратах энергохимических производств. - Новосибирск, 1985. - С.88-93.
57. *Перспективы малотоннажной плазмохимической технологии производства азотной системы в качестве удобрения / Дудников Ю.С., Жуков М.Ф., Кирышин В.И. и др.* // Энерготехнологич. процессы и аппараты химич. производств. - Новосибирск, 1989. - С.106-112.
58. *Бурдуков А.П., Богер А.Ф.* Исследование гидродинамики контактного устройства для неадиабатического массообмена // Энерготехнологич. процессы и аппараты химич. производств. - Новосибирск, 1989. - С.120-125.
59. *Дорохов А.Р., Лазарев С.И., Сердалов Г.С., Умеренков О.М.* О возможности организации "мягкого" барботажа в центробежном устройстве // Гидродинамика и процессы переноса в биореакторах. - Новосибирск, 1989. - С.151-153.

60. *Николаев Н.А., Жаворонков Н.М.* Ректификационные колонны с вихревыми прямоточными ступенями // Теоретич. основы химич. технологии. - 1970. - 4, N 2. - С.261-264.
61. *Николаев Н.А.* Исследование и расчет ректификационных и абсорбционных аппаратов вихревого типа // Автореф. дис....д-ра техн.наук. - Казань, 1974. - 42с.
62. *Николаев А.Н., Николаев Н.А., Малюсов В.А.* Вихревой аппарат для очистки газов : А.С. 1346206 СССР // Б.и 1987, N 39.
63. *Николаев А.Н., Малюсов В.А.* Аэродинамика двухфазного потока в вихревых массообменных аппаратах // Теоретич. основы химич. технологии. - 1989. - 23, N 2. - С.216-221.
64. *Николаев А.Н., Малюсов В.А.* Расчет эффективности в полых вихревых аппаратах // Теоретич.основы химич.технологии. - 1992.- 26, N1.- С.25-32.
65. *Гусленко В.И., Бегоулев П.Б., Мищенко Р.К.* Гидродинамические характеристики закрученного пленочного течения в аппаратах с восходящим потоком // Нефтепереработ. и нефтехимия. - 1982. - Вып. 23. - С.628-630.
66. *Сергеев Г.И., Фройштетер Г.Б., Тартаковский Ю.Б.* Экспериментальное исследование процесса переноса при обезвоживании вязких жидкостей в аппарате с закрученной пленкой // Тепло- и массоперенос. - 1972. - N 4. - С.330-334.
67. *Арестова Е.И., Рябченко Н.П.* Гидродинамические условия проведения окончательной дистилляции мисцеллы в аппаратах с закрученным потоком // Изв. вузов. Пищевая технология. - 1977. - N 5. - С.106-108.
68. *Рябченко Н.П., Аристова Е.И., Любченко Н.П.* Интенсификация дистилляции масляных мисцелл при использовании аппаратов с вихревым течением фаз // Изв. вузов. Пищевая технология. - 1977. - N 4.- С.145-149.
69. *Карих Е.М., Малик В.Н., Аношин И.М.* Массообменный аппарат с вращающимися желобчатыми ступенями // Изв. вузов. Пищевая технология. - 1977. - N 4. - С.130-133.
70. *Карпенко Л.А., Трошкин О.А., Карпенко И.А.* Исследование характеристик дисперсности эмульсий, получаемых при диспергировании жидкостей роторно-пульсационным аппаратом // Теоретич. основы химич. технологии. - 1978. - 12, N 5. - С.780-783.
71. *Koh S.T., Hiraoka S., Tada Y., Aragaki T., Yamada I., Takahashi T., Suzuki K.* Heat transfer in jet mixing vessel with rotating nozzle around the vessel axis // J.Chem. Eng. Jap. - 1990. - 23, N 5. - P.627-632.
72. *Zhu F.G., Ni X.D., Zhou Y.C., Yu S.C., Su Y.F.* A modified rotating disk contactor with wire mech coalescers // AIChE Symp. Ser. - 1984. - 80, N 238. - P.115-123.
73. *Дулатов Ю.А.* Исследование гидродинамических процессов в центробежном экстракторе с волнообразной насадкой // Автореф. дис...канд.техн.наук. - Казань,1970. - С.1-24.
74. *Долинский О.А.* Адиабатное испарение пленки жидкости на вращающемся диске // Автореф. дис...канд.техн.наук. - Киев,1985. - 16 с.
75. *Гупта А. Лилли Д., Сайред Н.* Закрученные потоки. - М.: Мир, 1987. - 588с.
76. *Найденев Г.Ф.* Газогорелочные устройства с регулируемыми характеристиками факела. - Киев: Техніка, 1974. - 112с.
77. *Хавкин Ю.И.* Центробежные форсунки.- Л.: Машиностроение, 1976. - 168с.
78. *Басина И.П., Тонконогий А.В., Корнеев Б.Н.* Движение горящих частиц в циклонных технологических камерах // Теплоэнергетика. - 1974. - N 3. - С.72-78.
79. *Тагер С.А., Талумаа Р.Ю., Калмару А.М., Казакова Н.А.* Исследование двухступенчатого циклонного сжигания высокосернистого мазута с подавлением образования NO<sub>2</sub> и SO<sub>3</sub> // Теплоэнергетика. - 1976. - N 2. - С.34-39.
80. *Hamamoto Y., Tomita E., Tanaka Y., Kotayama T., Tamura Y.* The effect of swirl on spark-ignition engine combustion // JSME Int.J. - 1987. - 30, N 270. - P.1995-2002.

81. *Lavoie G.A.* Correlations of combustion data for S.I. engine calculations: laminar flame speed, quench distance and global reaction rates // Trans. SAE. - 1978. - **87**, Sect.2. - N 780229. - P.1015-1021.
82. *Гороховский М.А., Хлынин В.П.* Расчет динамики закрученного вихревого течения в цилиндре двигателя внутреннего сгорания в процессе сжатия // Инж.-физ.журнал. - 1986. - **51**, N 4. - С.654-660.
83. *Мустафаев А.М., Гутман Б.М.* Гидроциклоны в нефтедобывающей промышленности. - М.: Недра, 1981. - 258 с.
84. *Dyakowsky T., Williams R.A.* Measurement of particle velocity distribution in a vertical channel // Powder Technology. - 1993. - **77**. - P.135-142.
85. *Roldan-Villasana E.J., Williams R.A., Dyakowsky T.* The origin of the fish-hook effect in hydrocyclone separators // Powder Technology. - 1993. - **77**. - P.243-250.
86. *Dyakowsky T., Williams R.A.* Modelling turbulent flow within a small-diameter hydrocyclone // Chemical Engineering Science. - 1993. - **48**, N 6.- P.1143-1152.
87. *Лопатин А.Г.* Турбулентность гидроциклонных потоков и основы массопереноса в них // Интенсификация процессов обогащения минерального сырья. - М., 1981. - С.35-40.
88. *Найденко В.В.* Применение математических методов и ЭВМ для оптимизации процессами разделения суспензий в гидроциклонах. - Горький: Волго-Вят. кн.изд-во, 1976. - 290 с.
89. *Филиштинский П.В.* Оптимизация осевых завихрителей потока жидкости (газа) с целью снижения гидравлических потерь // Автореф. дис....канд.техн.наук. - Л., 1983. - 21 с.
90. *Пономарев В.Г., Иваненко А.И., Яковина Н.П.* Изменение геометрии напорного гидроциклона для интенсификации разделительного процесса // Водоснабжение и сантехника. - 1978. - N 12. - С.8-11.
91. *Непомнящий Е.А., Кутепов А.М.* Расчет уноса частиц твердой фазы из конического гидроциклона // Теоретич.основы химич.технологии. - 1982. - **16**, N 1. - С. 78-82.
92. *Карпинский Ю.И.* К оценке сепарационных качеств гидроциклонов // Изв. вузов. Энергетика. - 1981. - N 7. - С.76-80.
93. *Иванов А.А., Кудрявцев Н.А.* К расчету параметров осевой зоны гидроциклона // Теор.основы хим.технол. - 1989. - **23**, N 3. - С.357-361.
94. *Иванов А.А., Кудрявцев Н.А.* Расчет снижения начальной закрутки потока в гидроциклоне // Расчет и конструир.аппаратов для разделения дисперс.систем. - Москва: Моск.ин-т хим.машиностр. - 1990. - С.32-35.
95. *Алпысбаев С.Т., Халатов А.А.* Турбоциклон // А.с. СССР N979712, МКИ<sup>3</sup> F04D 13/12, ВОЧ С 5/13. - Оpubл. 07.12.82. Бюл. N 45.
96. *Алпысбаев С.Т.* Совершенствование вакуумгидроциклона для очистки на насосных станциях закрытых оросительных систем // Автореф. дис....канд. техн.наук. - Киев, 1986. - С. 1-21.
97. *Алпысбаев С.Т., Халатов А.А., Козбаков Б.К. и др.* Гидроциклонная насосная установка // А.с. СССР N 1074607 А, МКИ<sup>4</sup> ВОЧ С5/26. - Оpubл. 23.02.84. Бюл. N7.
98. *Алпысбаев С.Т., Халатов А.А.* Центробежный насос для перекачивания двухкомпонентных сред // А.с. СССР N 1184974А, МКИ<sup>4</sup> F04D 7/104. - Оpubл. 15.10.85. Бюл. N 38.
99. *Белянин П.Н.* Центробежная очистка рабочих жидкостей авиационных гидросистем. - М.: Машиностроение, 1976. - 328 с.
100. *Гордон Г.М., Пейсахов И.Л.* Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии. - М.: Металлургия, 1977. - 456 с.
101. *Биргер М.А., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И. и др.* Справочник по пыле- и золоулавливанию. - М.: Энергия, 1975. - 296 с.

102. *Ogawa A., Seito O., Nakabayashi H.* On the spin- up time and the residue time of the turbulent rotational air flows in the special forms of the cyclone dust collectors // *Bul. JSME.* - 1986. - **29**, N 252. - P.1698-1703.
103. *Голубцов В.М., Михайличенко С.В.* К расчету коэффициентов сопротивления пылевых циклонов // *Теплоэнергетика.* - 1985. - N 4. - С.41-44.
104. *Серов Е.Ю., Чумаков А.Г.* Экспериментальное исследование движения газа в пылеуловителях со встречными закрученными потоками методом ЛДА // *Актуал. вопросы теплофизики и физич. гидрогазодинамики: Матер. 2 Всес.конф., март 1987.* - Новосибирск, 1988. - С.228-233.
105. *Шургальский Э.Ф.* Применение метода крупных частиц для исследования теплообмена между газом и частицами в аппаратах со встречными закрученными потоками // *Инж.-физ.журн.* - 1989. - **56**, N 4. - С.550-555.
106. *Горячев В.Д., Чернышев В.В., Корнев Г.П.* Сравнительное моделирование на ЭВМ аэродинамики аппаратов со встречными закрученными потоками и циклонов на основе двухпараметрической модели турбулентности // *Изв.вузов. Энергетика.* - 1984. - N 3. - С.67-72.
107. *Талиев В.Н., Джохадзе З.И., Векуа Т.Ю.* Экспериментальное исследование аппарата со встречными закрученными потоками при адиабатном процессе обработки воздуха // *Изв.вузов. Строительство и архитектура.* - 1984. - N 4. - С.95-97.
108. *Гудим Л.И., Фокин И.Ф., Луценко В.М.* Исследование, разработка и внедрение пылеуловителей со встречными закрученными потоками // *Аппараты с актив. гидродинам.режимами для текстил. промышленности и производства хим. волокон.* - М., 1983. - С.66-70.
109. *Рабинович В.Б., Куклин И.А., Финогенова Н.Ю.* Исследование циклонов со встречными закрученными потоками // *Безопас.труда в цвет.металлургии.* - Свердловск, 1989. - С.99-108.
110. *Степанов Г.Ю., Зицер И.М.* Инерционные воздухоочистители. - М.: Машиностроение, 1986. - 184 с.
111. *Сафонов В.Н., Приходько В.П., Лебедюк Г.К., Тарат Э.Я.* Эффективность улавливания капель в центробежном каплеуловителе с цилиндрическим завихрителем и центральным вводом потока // *Пром. и сан.очистка газов (Москва).* - 1984. - N 1. - С.9-10.
112. *Сафонов В.Н., Приходько В.П., Лебедюк Г.К., Тарат Э.Я.* Аэродинамика газожидкостного закрученного потока в центробежном каплеуловителе с цилиндрическим завихрителем // *Пром. и сан. очистка газов (Москва).* - N 2. - С.11-12.
113. *Дыскин Л.М.* Экспериментальные характеристики вихревого воздухоосушителя // *Вопр.отопления и вентиляции произв. зданий.* - Л., 1983. - С.37-43.
114. *Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Мордасов А.П.* Закрученные потоки в гидротехнических сооружениях. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 280 с.
115. *Зятиков П.Н., Рослик А.Г.* Исследование воздушноцентробежного классификатора дисперсных материалов // *Методы гидро-аэродинамики в приложении к некоторым технологическим процессам.* - Томск, 1977. - С.134-143.
116. *Шиляев М.И.* Газодинамические процессы в рабочих элементах ротационных сепараторов // *Автореферат дис. ... д-ра техн.наук.* - Новосибирск, 1984. - 37с.
117. *Резняков А.Б., Устименко Б.П., Вышенский В.В., Курмангалиев М.П.* Теплотехнические основы циклонных топочных и технологических процессов, Алма-Ата: Изд-во "Наука", Каз.ССР, 1974. - 375с.
118. *Глотов Г.Ф.* Схема вихревого конвертора//Тепло- и массообмен в ваннах сталеплавильных агрегатов. - М., 1985. - С.101-1087
119. *Волчков Э.П., Балдинов Г.Р., Терехов В.И., Ткач Ю.Н.* Исследование закономерностей развития струи в закрученном потоке газа // *Генерация потоков*

- электродуговой плазмы. - Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1987. - С.184-199.
120. *Кислых В.И., Балдинов Г.Р.* Исследование характеристик вихревых камер с разрядом в приосевой зоне // 8 Всес.конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. - Новосибирск, 1980. - С.53-56.
  121. *Глуценко В.М., Вороновский Ю.Л.* Влияние вихревого эффекта на теплообмен в генераторе термомеханических аэрозолей//Вихревой эффект и его применение в технике. - Куйбышев, 1984. - С.203-208.
  122. *Волчков Э.П., Сериков Л.В.* Гидродинамика вихревого биореактора // Гидродинамика и процессы переноса в биореакторах. - Новосибирск, 1989. - С.40-48.
  123. *Павлов С.В.* Влияние распределителя потока в вихревой камере хлопьеобразования на коэффициент ее объемного использования // Водоснабжение, водоотведение и гидравлика на ж.-д.транспорте. Посвящ. 90-летию каф. Водоснабжения и канализации. - Л., 1985. - С.47-51.
  124. *Котляров О.Л.* Математическая модель вихревого гранулятора // Тепло- и энергосбережение, теплотрия / АН УССР. Ин-т проблем энергосбережения. Киев, 1990. - С.31-35.
  125. *Костенко Н.В., Халатов А.А., Процышин Б.Н., Кобзар С.Л., Коваленко Г.В.* Линия получения аэрозоля // А.с. N 1797499 АЗ СССР, МКИ<sup>5</sup> В 05 В 17/00, 7/16. - Опубл. 23.02.93. Бюл. N 7.
  126. *Вихревые аппараты с дисперсным слоем / СО АН СССР. Ин-т теплофизики. - 1990. - 4 с.*
  127. *Ладаев Н.М., Захаров В.М., Блиничев В.Н.* Исследование теплообмена в роторной мельнице // Изв.вузов. Химия и хим. технология. - 1990. - **33**, N 2. - С.117-119.
  128. *Suzuki R., Matsui K., Mochimaru Y.* Bubble elimination by swirl flow // J. Jap. Hydraul. and Pneum. - 1988. - **19**, N 6. - P.499-502.
  129. *Cohen S., Maron D.M.* Experimental and theoretical study of a rotating annular flow reactor // Chem.Eng. J. - 1983. - **27**, N 2. - P.87-97.
  130. *Yakoub N., Maron D.M.* Theoretical analysis of a rotating annular reactor in the laminar and vortex regimes // Chem. Eng.J. - 1984. - **29**, N 3. - P.115-125.
  131. *Конonenко В.Д., Бунин В.В., Островский Г.М.* Опыт внедрения систем пневмотранспорта в закрученном газовом потоке // Механизация и автоматизация перемещения и складирования сыпучих и жидких материалов. - Л., 1989. - С.8-11.
  132. *Халатов А.А., Костенко Н.В., Кобзар С.Л.* Устройство для получения смеси // А.с. N1607915 А1, МКИ<sup>5</sup> В 01 F 5/00. - Опубл. 23.11.90. Бюл. N 43.
  133. *Федотов В.А.* Переходные процессы в вихревых каналах // Изв. вузов. Машиностроение. - 1980. - N 5. - С.55-58.
  134. *Франк Э.Г., Ларионов С.А.* Динамические характеристики гидравлических вихревых усилителей // Изв.вузов. Авиационная техника. - 1987. - N 1. - С.118-122.
  135. *Boucher R.F., Kitsios E.E.* Eulerian transformation of vortex amplifier static characteristics // Trans. ASME. J.Dyn. Syst., Meas., and Contr. - 1984. - **106**, N 3. - P.236-239.
  136. *King C.F.* The design of radial vortex amplifiers for high performance power fluidics// Trans. ASME. J.Dyn. Syst., Meas., and Contr. - 1987. - **109**, N 1. - P.44-48.
  137. *Stairmand J.W.* Flow patterns in vortex chambers for nuclear duties // Nucl. Energy. - 1990. - **29**, N 6. - P.413-418.
  138. *Щукин В.К., Халатов А.А.* Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. - М.: Машиностроение, 1982. - 200 с.
  139. *Щукин В.К.* Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. - М.: Машиностроение, 1980. - 240 с.

140. *Bergles A., Blumenkrantz A., Taborek J.* Performance evaluation criteria for enhanced heat transfer surfaces // Proc.Fifth Heat Transfer Conference (Tokyo). - 1974. -2. - P.239-243.
141. *Khalatov A.* Swirling flows in heat exchangers: heat transfer and hydrodynamics in tubes // Report TGD-95/1, Thermogasdynamics Department, Institute of Engineering Thermophysics, Kiev, Ukraine. - 1995. - P.1-67.
142. *Khalatov A.* Swirling flows in heat exchangers: twisted tubes // Report TGD-95/2, Thermogasdynamics Department, Institute of Engineering Thermophysics, Kiev, Ukraine. - 1995. - P.1-54.
143. *A.Klaczak.* Heat Transfer in Tubes with Spiral and Helical Turbulators // Trans.ASME. J. Heat Transfer - 1973. - N 4. - P. 134 - 136.
144. *R.Sethumadhavan and M.Raja Rao.* Turbulent Flow Heat Transfer and Fluid Friction in Helical - Wire - Coil - Inserted Tubes // International Journal of Heat and Mass Transfer. - 1983. - 26, N 12. - P. 1833 - 1845.
145. *S.Uttarwar and M.Raja Rao.* Augmentation of Laminar Flow Heat Transfer in Tubes by Means of Wire Coil Inserts // Trans.ASME. J. Heat Transfer - 1985. - N 4. - P. 160 - 166.
146. *J.Chiou.* Experimental Investigations of the Augmentation of Forced Convection Heat Transfer in a Circular Tube Using Spiral Spring Inserts // Trans.ASME. J. Heat Transfer - 1988. - N 1. - P. 13 - 21.
147. *Статьи*, напечатанные в российских и украинских журналах в 1975-1995 гг.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА к части 7, опубликованная в 1992-1998гг.

1. Perron J., Bui R.T. Four rotatifs: Modele dynamique du mouvement du lit // Can.J. Chem. Eng. - 1994. - **72**, N 1. - P.16-25.
2. Hanaoka Y., Takahashi H., Tokura I. A study on flow field in a rotating column type reactor by visualized images // Proc. 3rd. Asian Symp. Visual., Chiba, May 15-20, - 1994: ASV'94. - Tokyo, 1994. - P.745-750.
3. Frankovic B. Исследование теплопередачи в сухом вращающемся теплообменнике // Strojarstvo. - 1993. - **35**, N 3-4. - С.111-120.
4. Ohue H., Kawashima G., Yang W.-S. Visualization of unsteady flow in rotating drums//Flow Visualizat. 6. Proc. 6th Int. Symp., Oct. 5-9, 1992. - Yokohama-Berlin etc., 1992. - P.62-66.
5. Wang F.Y., Cameron I.T., Lister J.D., Douglas P.L. A distributor parameter approach to the dynamics of rotaty drying processes // Drying Technol. - 1993. - **11**, N 7. - P.1641-1656.
6. Куцакова В.Е., Марков Н.Б., Червяков А.В. Экспериментальное построение гидродинамической модели аппарата со встречно-закрученными потоками // Ж. прикл. химии. - 1993. - **66**, N 11. - С.2600-2603.
7. Воронцов Е.Г., Барштейн В.Ю. Оптимальные параметры тонкожидкостного слоя в роторных аппаратах // Пром.теплотех. - 1993. - **15**, N4. - С.70-72.
8. Бреев И.М. Применение вихревого охладителя для влагоочистки в промышленных пневмосетях // Пром.теплотех. - 1993. - **15**, N 4. - С.45-48.
9. Cook C.A., Cundy V.A. Heat transfer between a rotating cylinder an a moist granular bed // Int.J. Heat and Mass Transfer. - 1995. - **38**, N 3. - P.419-432.
10. Charoenphonphanich C., Ennoji H. Intake and compression-generated tumble and swirl in a 4-valve spact ignition engine // Proc. 3rd Asian Symp. Visual., Chiba, May 15-20, 1994: ASV'94. - Tokyo, 1994. - С.600-605.
11. Tanabe S., Lin G.B., Kashiwada Y., Waka R. Discharge coefficient of poppet intake valve with rotating flow // Trans. JSME. Ser.B. - 1994. - **60**, N 572. - P.1463-1469.
12. Терновский И.Г., Кутелов А.М. Гидроциклонирование. - М.:Наука,1994. - 350с.
13. Li H., Tonita Y. A numerical simulation of swirling flow pneumatic conveying in a horizontal pipeline // Trans. JSME. Ser.B. - 1994. - **60**, N 575. - P.2431-2438.
14. Ипатова Л., Лукьянченко А. Струйно-вихревая мельница для получения кормовых добавок // Комбикорм пром-ть. - 1995. - N 2. - С.25.
15. Na M.Y, Kim K., Kim K.C., Lee S.N. Transient analysis of thermo-fluid phenomena in twin-roll continuous casting // Int J. Heat and Mass Transfer. - 1994. - **37**, N 14. - P.2059-2068.
16. Зимин А.И., Балабышко А.М., Ружицкий В.П. Анализ гидромеханических процессов и расчет кавитационного режима диспергирования в гидромеханическом диспергаторе / Уголь. - 1995. - N 3. - С.46-47.
17. Halm D., Pismen L.M. Performance of a photochemical reactor in the regime of Taylor-Gortler vortial flow // Chem. Eng. Sci. - 1994. - **49**, N 8. - P.1119-1129.
18. Takahashi F., Schmoll N.I., Dressler I.L. Characteristics of a velocity-modulated pressure-swirl atomizing spray measured by the phase-Doppler method // AIAA Pap. - 1994. - N 558. - P.1-9.
19. Zheng N., Wotek N.M., Novosel D. Performance optimization of rotary dehumidifiers // Trans. ASME. J.Sol. Energy Eng. - 1995. - **117**, N 1. - P.40-44.

20. *Chant E.E., Jeter S.M.* On the use of the parabolic concentration profile assumption for a rotary desiccant dehumidifier // Trans. ASME. J. Sol. Energy Eng. - 1995. - **117**, N1. - P.45-50.
21. *Cundy V.A., Cook C.A.* A study of parameters influencing wall-to-bed heat transfer in low-temperature rotary desorbers // Trans. ASME. J. Energy. Pesour. Technol. - 1995. - **117**, N 1. - P.50-57.
22. *Zheng N., Wotek N.M., Novosel D.* Effect of operating conditions on optimal performance of rotary dehumidifiers // Trans. ASME. J. Sol. Energy Eng. - 1995. - **117**, N 1. - P.62-66.
23. *Cook C.A., Cundy V.A.* Heat transfer between a rotating cylinder and a moist granular bed // Int. J. Heat and Mass Transfer. - 1995. - **38**, N 3. - P.419-432.

*АРТЕМ АРТЕМОВИЧ ХАЛАТОВ*  
*АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ АВРАМЕНКО*  
*ИГОРЬ ВЛАДИМИРОВИЧ ШЕВЧУК*

**ТЕПЛООБМЕН**  
**И**  
**ГИДРОДИНАМИКА**  
**В ПОЛЯХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ**  
**МАССОВЫХ СИЛ**

**Том 4**

Компьютерный набор и верстка Ин-та технической теплофизики НАН Украины  
252057, Киев, ул.Желябова,2а

Подп. к печ. 19.10.99. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетн. Способ печати офсетный. Условн. печ. л. 12,32.  
Условн. кр.-отт. 12,55. Уч.-изд.л. 12,47.  
Тираж 500 экз. Зак. № 93284.

Фирма «Випол»  
252151, г.Киев, ул.Волынская, 60

Отдел высокотемпературной термогазодинамики Института технической теплофизики Национальной академии наук Украины в течении последних 16 лет является одним из лидеров в области исследований теплообмена и гидродинамики потоков в полях центробежных массовых сил. Результатом этих исследований явилась публикация более 200 научных и прикладных работ и более 50 авторских свидетельств и патентов. В их числе следующие монографии:

1. *А.А.Халатов*. Теория и практика закрученных потоков. - Киев: Наукова думка, 1989. - 192 с.
2. *А.А.Халатов, А.А.Авраменко, И.В.Шевчук*. Теплообмен и гидродинамика около криволинейных поверхностей. - Киев: Наукова думка, 1992. - 136 с.
3. *А.А.Халатов, А.А.Авраменко, И.В.Шевчук*. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил: В 4-х т. - Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 1996. - Т.1: Криволинейные потоки. - 290 с.
4. *А.А.Халатов, А.А.Авраменко, И.В.Шевчук*. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил: В 4-х т. - Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 1996. - Т.2: Вращающиеся системы. - 289 с.
5. *Халатов А.А., Шевчук И.В., Авраменко А.А., Кобзарь С.Г., Железная Т.А.* Термогазодинамика сложных потоков около криволинейных поверхностей. - Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 1999. - 300 с.
6. *А.А.Халатов, А.А.Авраменко, И.В.Шевчук*. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил: В 4-х т. - Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2000. - Т.3: Закрученные потоки. - 474 с.
7. *А.А.Халатов, А.А.Авраменко, И.В.Шевчук*. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил: В 4-х т. - Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2000. - Т.4: Инженерное и технологическое оборудование. - 212 с.