Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Е. Ю. Темникова, А. Р. Богомолов

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе для аспирантов всех форм обучения

Рекомендовано учебно-методической комиссией
направления подготовки бакалавров 13.06.01
«Электро- и теплотехника»
в качестве электронного издания
для использования в учебном процессе

Кемерово 2016

Рецензенты:

Дворовенко И. В. – доцент кафедры теплоэнергетики

Семыкина И. Ю. – председатель учебно-методической комиссии направления подготовки аспирантов 13.06.01 «Электро- и теплотехника»

Темникова Елена Юрьевна. Теплофизика и теоретическая теплотехника [Электронный ресурс]: методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе для аспирантов направления подготовки 13.06.01 «Электро- и теплотехника» всех форм обучения / Е. Ю. Темникова, А. Р. Богомолов; КузГТУ. – Электрон. дан. – Кемерово, 2016. – Систем. требования: Pentium IV; ОЗУ 8 Гб; Windows 2003. – Загл. с экрана.

Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и предназначены для аспирантов направления 13.06.01 «Электро-и теплотехника» всех форм обучения.

© КузГТУ, 2016
© Темникова Е. Ю,
Богомолов А. Р., 2016

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Цель практических занятий – получение аспирантами навыков решения задач в области теплофизических и массообменных процессов, что позволит им подготовиться к проведению теоретических и экспериментальных исследований.

На практических занятиях аспиранты с преподавателем решают задачи согласно обозначенным темам и предложенным номерам задач из сборников задач, в которых приведены теоретические положения, основные зависимости, примеры решения и контрольные задачи по каждому виду решаемых задач. В зависимости от специфики темы научного исследования аспиранта возможно углубить и расширить определенные темы практических занятий с некоторым уменьшением внимания на другие.

Аспиранты решение задач проводят в ученических тетрадях в определенной последовательности. Сначала записывают исходные данные с обозначением величин и единицами измерения, затем параметры, которые нужно найти. В решении задачи обязательно приводятся формулы и их преобразования, подстановка значений величин в соответствии с формулой и ответ с единицами измерения. Если возникают сомнения в правильности единиц измерения, проводят проверку путем подстановки единиц измерения величин в формулу, их развертывание до простых единиц, применяемых в системе СИ и получение конечной.

Преподаватель непосредственно на занятии контролирует решение задач.

В таблице приведены темы практических занятий и номера задач из сборников, ниже перечислены задачники [1-3].

Тема занятия	Содержание занятия
1. Стационарная теплопроводность	1.2-1.12, 1.16-1.20 [3]
2. Нестационарная теплопроводность	2.1, 2.3, 2.4, 2.9 [3]
3. Конвективный теплообмен	1.6, 1.15, 1.37 [1], 3.5, 3.16, 4.20, 4.22, 5.16 [3]
4. Теплообмен при кипении	2.2, 2.3, 2.15, 2.32 [2], 6.1, 6.2, 6.4-6.12 [3]
5. Теплообмен при конденсации	1.10, 1.27 [1], 7.2, 7.20-7.23 [3]
6. Испарение и конденсация парогазовых смесей	8.1, 8.6-8.9, 8.26, 9.1-9.3, 9.6-9.11 [3]
7. Теплообмен излучением	1.16, 1.17 [1], 10.1-10.4, 10.6, 10.12-10.20 [3]
8. Расчет теплообменных и массообменных аппаратов и систем	1.40, 2.9, 2.19, 3.22 [1], 1.29, 1.52[2], 12.3, 12.7, 12.9, 12.24 [3]

ЗАДАЧНИКИ:

1. Богомолов, А. Р. Теория, примеры и задачи по расчету тепломассообменного оборудования предприятий. ч. 1 [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Р. Богомолов, Е. Ю. Темникова. – Кемерово, 2012. – 180 с. – Режим доступа: http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90568&type=utchposob:common

2. Богомолов, А. Р. Теория, примеры и задачи по расчету тепломассообменного оборудования предприятий. Ч. 2 [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А. Р. Богомолов, Е. Ю. Темникова. – Кемерово, 2012. – 119 с. – Режим доступа: http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90569&type=utchposob:common

3. Цветков, Ф. Ф. Задачник по тепломассообмену: учеб. пособие / Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов, В. И. Величко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 196 с.

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

Самостоятельная работа аспирантов очной и заочной формы обучения предусматривает выполнение домашних работ (ДР) к контрольным 4, 8, 12 и 16 неделям:

ДР 1. Поиск литературы и составление библиографии по проблеме теплофизики;

ДР 2. Поиск публикаций в периодических изданиях (в том числе в электронных источниках) по проблемам теплофизики;

ДР 3. Составление обзора по теплофизике, выявление актуальности проблемы;

ДР 4. Разработка схемы экспериментального стенда с подбором измерительно-контролирующих приборов и различных устройств, методики эксперимента.

Кроме того аспиранты заочной формы обучения выполняют и сдают контрольную работу, состоящую из контрольных задач.

У каждого аспиранта, как правило, определена тема научного исследования (диссертации), которая связана с научным направлением – теплофизика и теоретическая теплотехника. Поэтому в качестве проблемы теплофизики для выполнения домашних работ можно взять непосредственно свою тему научного исследования или небольшую задачу, которая является составной частью темы исследования. В ином случае проблему (задачу) назначает преподаватель индивидуально каждому аспиранту.

Каждая последующая домашняя работа связана с предыдущей и к выполнению следующей домашней работы следует приступать после завершения предыдущей.

Для пояснения в качестве примера будут использоваться материалы диссертации Богомолова Александра Романовича на тему «Теплообмен и гидродинамика при конденсации пара в зернистых слоях с различным углом смачивания», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Библиографическое описание источников литературы оформляется в соответствии с

- ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления;
- ГОСТ 7.80-2000. Библиографическая запись. Заголовок. Общие требования и правила составления;
- ГОСТ 7.82-2001. Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов. Общие требования и правила составления.

ДР 1. Поиск литературы и составление библиографии по проблеме теплофизики

В первой домашней работе под литературой понимаются такие источники как книги, брошюры, монографии, диссертации, авторефераты, депонированные рукописи, научно-технические отчеты и др. непериодического издания. Также отнесем сюда патентную информацию, а именно, сведения об изобретениях и полезных моделях.

Поиск и изучение литературы по выбранной теме нужно начинать с общих работ, чтобы получить представление об основных работах, к которым примыкает избранная тема.

Поиск литературы нужно осуществлять различными способами и в сети Интернет с использованием обычных поисковых систем, электронно-библиотечных систем (ЭБС), например, Университетская библиотека онлайн (www.biblioclub.ru); Издательство «Лань» (e.lanbook.com); и в каталогах библиотек КузГТУ или других учреждений, например, Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Томского политехнического университета, желательно при их непосредственном посещении, совместив посещение библиотеки с участием в конференции.

Начинать поиск литературы следует с классических работ в данной области. Для этого нужно выяснить, какие люди внесли большой вклад в данном направлении. Например, в теории теплообмена при конденсации классиками считаются А. И. Леонтьев, С. С. Кутателадзе, В. Е. Накоряков, А. В. Лыков и др.

1. Теория тепломассообмена / С. И. Исаев [и др.]; под ред. А. И. Леонтьева. – М.: Высш. школа, 1979. – 495 с.

2. Кутателадзе, С. С. Теплопередача при конденсации и кипении / С. С. Кутателадзе. – М-Л.: Гос. науч.-техн. изд-во маш. лит-ры, 1952. – 232 с.
3. Накоряков, В. Е. Тепломассоперенос в двухфазных системах / В. Е. Накоряков, А. В. Горин. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 1994. – 431 с.

Зернистыми слоями занимались М. А. Гольдштик, М. Э. Аэров, О. М. Тодес, а явлениями смачивания – Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов.

1. Гольдштик, М. А. Процессы переноса в зернистом слое / М. А. Гольдштик. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2005. – 358 с.
2. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес. – Л.: Химия, 1968. – 512 с.
3. Сумм, Б. Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. – М.: Химия, 1976. – 232 с.

Для поиска диссертаций и авторефератов по данной тематике можно воспользоваться базой диссертаций Российской государственной библиотеки (http://www.rsl.ru/) или другими электронными библиотеками, базами.

1. Дворовенко, И. В. Теплообмен при пленочном кипении и конденсации в зернистом слое: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.05 / Дворовенко Игорь Викторович. – Томск, 1997. – 18 с. – Библиогр.: с. 17-18.
2. Азиханов, С. С. Влияние гидродинамики на теплообмен при конденсации пара на трубе в зернистом слое: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12: защищена 01.07.09: утв. … / Азиханов Сергей Сейфудинович. – Кемерово, 2009. – 177 с. – Библиогр.: с. 153-163.

На сайте Федерального института промышленной собственности http://www1.fips.ru/ можно найти имеющиеся патенты на изобретения или свидетельства на полезные модели. Для этого нужно зайти в «Информационные ресурсы», затем в зависимости от как вести поиск выбрать «Информационно-поисковая система» (поиск по ключевым словам) или «Открытые реестры» (поиск по номеру патента).

1. Пат. 2091118 Российская Федерация, МПК B01D5/00. Способ отделения неконденсирующихся газов и устройство для его осуществления / Ю. О. Афанасьев, П. Т. Петрик, А. Р. Богомолов; патентообладатель Институт теплофизики СО РАН. – № 930311449/25; заявл. 08.06.93; опубл. 27.09.1997. – 2 с.

2. Кожухотрубный конденсатор: пат. 2000530 Рос. Федерация: МПК F28D7/00, F28F13/06, F28B1/02 / Ю. О. Афанасьев, А. Р. Богомолов, П. Т. Петрик; патентообладатель Институт теплофизики Сибирского отделения Российской АН. – № 04953239; заявл. 27.05.91; опубл. 07.09.1993. – 3 с.

Общий список литературы рекомендуется проанализировать и оформлять раздельно по внутреннему содержанию источников, например, отдельно по теплообмену при конденсации, по процессам в зернистых средах, и по поверхностным явлениям.

ДР 2. Поиск публикаций в периодических изданиях (в том числе в электронных источниках) по проблемам теплофизики

Во второй домашней работе под периодическими изданиями понимаются журналы, сборники научных трудов, материалы конференций, семинаров, симпозиумов. Тогда публикации – это статьи, материал или тезис доклада на конференции.

Для поиска статей в журналах нужно использовать Научную электронную библиотеку eLibrary.ru (http://elibrary.ru/). В ней имеется каталог журналов, с помощью которого можно найти конкретный журнал и его выпуск с содержанием. Обычно просматриваются все номера журналов, выпускаемых по вашей тематике, с целью обнаружения интересной статьи. Например, по тематике теплообмена при конденсации список будет содержать следующие журналы:

- Теплофизика и аэромеханика;
- Теплоэнергетика;
- Инженерно-физический журнал;
- Промышленная теплоэнергетика;
- Холодильная техника;
- Известия РАН. Энергетика;
- Известия Томского политехнического университета;
- Теоретические основы химической технологии;
- International Journal of Heat and Mass Transfer;
- Heat and Mass Transfer;
- Journal of Engineering Thermophysics и др.

Для выбора необходимых журналов в библиотеке eLibrary.ru используйте «Тематический рубрикатор», где в рубриках, например, «Энергети-

ка», «Химическая технология. Химическая промышленность» или «Физика», просмотрите весь список журналов.

Можно поступить проще и перейти на «Поисковые запросы», где по словам или словосочетаниям можно найти публикации, однако, есть вероятность пропустить важную публикацию, так как поиск ограничится только теми словами, которые вы выберите. Желательно здесь проявить творчество и поиск осуществлять по всевозможным вариациям словосочетаний, используя взаимозаменяющие слова.

1. Зейгарник, Ю. А. Теплообмен в пористых структурах: современное состояние и основные направления исследования / Ю. А. Зейгарник, В. М. Поляев // Теплоэнергетика. – 1996. – № 1. – С. 62-70.

2. Горин, А. В. Теплообмен при конденсации неподвижного пара на пластине, погруженной в зернистый слой / А. В. Горин, В. Е. Накоряков, О. Н. Цой // ИФЖ. – 1988. – Т. 54. – № 2. – С. 181-188.

3. Cheng, P. Transient film condensation on a vertical surface in a porous medium / P. Cheng, K. Chui // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1984. – V. 27, No. 5. – P. 795-798.

4. Plumb, O. A. Film condensation on a vertical flat plate in a packed bed / O. A. Plumb, D. B. Burnett, A. Shekarriz // J. Heat Transfer. – 1991. – V. 112. – P. 235-239.

5. Риферт, В. Г. Исследование механизма пленочной конденсации пара при воздействии поверхностных сил / В. Г. Риферт, П. А. Барабаш, А. И. Сардак, А. Н. Тобилевич // ИФЖ. – 1985. – Т. 49, № 2. – С. 189-194.

Современные публикации в материалах конференций, сборников трудов можно найти в сети Интернет, используя любую поисковую систему. Более ранние публикации, которые изданы в твердом виде (не электронном) находятся в библиотеках учреждений по месту их издания или по месту проведения конференции.

Нужно обратить внимание на то, что конференции, семинары, симпозиумы чаще всего проводятся с определенной периодичностью и посвящены определенной тематике, поэтому не сложно узнать какие конференции важны для вашей темы исследования.

С точки зрения тематики теплообмена при конденсации пара интересны следующие конференции:

- Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ), Москва;

- Научная международная конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Алушта;
- Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике, разные города
- Всероссийская конференция "XXXI Сибирский теплофизический семинар", Новосибирск;
- International Conference on Materials Science and Energy Engineering (CMSEE);
- International Symposium Turbulence, Heat and Mass Transfer (THMT) и др.

Желательно, чтобы вы обратились к научному руководителю по поводу имеющихся у него материалов конференций или у его коллег по кафедре или научной работе, так как участвующим в научных мероприятиях вручают материалы.

В качестве примеров библиографического описания опубликованных докладов и тезисов конференций приводятся:

1. Бузник, В. М. К вопросу влияния сил поверхностного натяжения на коэффициент теплоотдачи при конденсации пара на наклонной трубе / В. М. Бузник, В. А. Александров, Г. Ф. Смирнов // Теплообмен и гидродинамика в двухфазных средах: сб. научн. тр. – Киев: Ак. наук Укр. ССР, 1967. – С. 36-42.
2. Накоряков, В. Е. Пленочная конденсация на наклонной поверхности в пористой среде / В. Е. Накоряков, Г. С. Сердаков, В. А. Мухин, П. Т. Петрик // Теплофизика и гидродинамика в процессах кипения и конденсации: сб. научн. тр. – Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1985. – С. 110-125.
3. Петрик, П. Т. Теплообмен при конденсации на трубах, помещенных в зернистую среду / П. Т. Петрик, А. Р. Богомолов // Первая Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ). Испарение, конденсация, Т. 5. – Москва, 1994. – С. 126-131.
4. Богомолов, А. Р. Гидродинамика в конденсаторах в зернистом слое / А. Р. Богомолов, С. С. Азиханов, К. В. Гуцал, Е. Ю. Темникова // 2-й семинар вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике, 24-27 октября 2001. – Томск: ТПУ, 2002. – С. 66-71.
5. Богомолов, А. Р. Пленочное и струйное течение жидкости в шаровых засыпках / А. Р. Богомолов, С. С. Азиханов // XXVIII Сибирский теплофизический семинар: Тез. докл., 12-14 окт. 2005 г., Новосибирск. – Новосибирск, 2005. – С. 35-36.
6. Gorin, A. V. Film condensation on a surfaces embedded in porous media / A. V. Gorin, O. N. Tsoy // Evaporative cooling sys-

tems of electronic equipment: Proc. International Seminar, Novosibirsk, USSR, Aug., 19-22, 1991. – Novosibirsk, 1993. – P. 288-301.

7. Shilyaev, M. I. Heat transfer at condensation of immobile vapor on tubes, placed a granular layer / M. I. Shilyaev, A. R Bogomolov, P. T. Petrik // Materials of 18th International Congress of Chemical and Process Engineering, 24-28 August 2008, Praha, Czech Republic, CHISA 2008. – CD-ROM of Full Texts. – Praha, 2008. – 15 p.

8. Bogomolov, A. R. Condensation of steam on a vertical tube in a granulated material / A. R. Bogomolov, P. T. Petrik, I. V. Dvorovenko // Two-phase systems for ground and space applications: The second international topical team Workshop, October 26-28, 2007, Kyoto, Japan. // Microgravity Science and Technology. International Journal for Microgravity Research and Applications. – 2007. – T. XIX, No 3-4. – P. 93-95.

9. Боярский, А. С. Развитие промышленного комплекса г. Кемерово в условиях работы СГК Кемеровской генерации [Электронный ресурс] / А. С. Боярский, Л. Ю. Любавина, Е. Ю. Темникова, А. Р. Богомолов // I Всеросс. науч.-практ. конф. «Энергетика и энергосбережение: теория и практика»: сб. мат., 3-5 дек. 2014 г., Кемерово. – Кемерово, 2014. – Режим доступа: http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Other/2014/oldenerg1/energ1/pages/sections.htm. – Загл. с экрана.

Общий список публикаций рекомендуется оформлять раздельно, проанализировав внутреннее содержание источников, например, отдельно по теплообмену при конденсации, по процессам в зернистых средах, и по поверхностным явлениям.

ДР 3. Составление обзора по теплофизике, выявление актуальности проблемы

До выполнения третьей домашней работы нужно изучить найденные по вашей теме исследования издания (публикации). При этом важно уметь выполнять реферирование материала и в результате составить научный обзор.

Научный обзор – это текст, содержащий синтезированную информацию сводного характера по какому-либо вопросу или ряду вопросов, извлеченную из некоторого множества специально отобранных для этой цели первичных документов.

Чаще всего обзор содержит следующие элементы: реферат, вводную часть, аналитическую часть, выводы.

В вводной части обзора обосновывается выбор темы с указанием актуальности и значимости вопроса, назначение обзора, временного интервала анализируемого периода, видов используемых источников, тематических границ анализа рассматриваемого вопроса.

Аналитическая часть содержит анализ и его результаты, обобщение и оценку систематизированных сведений о состоянии рассматриваемых и нерешенных вопросов, использованные методы и средства исследования, состояние исследований и разработок, достигнутый научно-технический уровень, организационно-техническую ситуацию, тенденции развития.

Не забывайте пользоваться ссылкой на цитируемые источники.

Приведем в качестве примера часть параграфа 1.5. «Экспериментальные и теоретические исследования пленочной конденсации пара на поверхностях, упакованных в зернистую среду» из диссертации А.Р. Богомолова.

> Одним из путей интенсификации процессов тепломассопереноса является использование зернистых сред, определенным образом укладываемых на поверхностях охлаждения. Обоснование использования таких систем в различных областях техники требует тщательного как теоретического, так и экспериментального рассмотрения.
>
> Ченг (P. Cheng) [168] исследовал стационарную пленочную конденсацию пара на поверхности клина или конуса, помещенного в пористую среду. Аналогично классическим задачам по пленочной конденсации предполагается, что между конденсатом и паром имеется четкая граница и отсутствует двухфазная зона и что конденсат характеризуется постоянными свойствами. Первое допущение о четкой границе между паром и жидкостью было также использовано Парминтером [191].
>
> …
>
> Накоряков и др. [171] решали задачу получения теоретических и экспериментальных данных по гидродинамике течения пленки конденсата и теплопередаче при конденсации насыщенного неподвижного пара в узких щелях. Рассматривалась узкая вертикальная щель, образованная «нетеплопроводными» ребрами, примыкающими к гладкой теплопроводной стенке, от которой может отводиться тепло. Пар конденсируется на наружной поверхности пленки, стекающей в щели (рис. 1.5.1). Узкая щель нашла широкое применение при исследовании гидродинамических характеристик фильтрационных потоков, в основе которой

лежит аналогия осредненных уравнений ламинарного движения по ширине щели уравнениям Дарси в пористой среде.

…

Кавиани [177] (Kaviany) в своем исследовании отметил, что результаты, основанные на допущениях, принятых Ченгом, дают число Нуссельта, скорость потока конденсата и толщину пленки конденсата как функцию параметра переохлаждения. Распределение постоянной скорости пленки является результатом применения закона Дарси. Капиллярное давление, которое пропорционально $\sigma(K/\varepsilon)^{-1/2}$ и зависит от насыщенности, будет становиться значительным при низкой проницаемости. Кавиани сделал вывод, что число Прандтля оказывает влияние на толщину пленки через конвективный член в уравнении энергии, и для относительно низких чисел Прандтля профиль температур становится близким к линейному.

…

Лазарев и др. [179] отметили, что существует способ интенсификации теплообмена при конденсации, не связанный с изменением конструкции аппарата. В [173, 175] было экспериментально показано, что при конденсации на наклонной пластине, помещенной в зернистый слой, коэффициент теплоотдачи может быть выше, чем в известных классических работах на свободных гладких поверхностях при прочих равных условиях. Теплообмен при конденсации на пластине, погруженный в зернистый материал, отличается от классического механизма теории Нуссельта. Когда толщина пленки конденсата много меньше диаметра частицы и конденсат хорошо смачивает материал частиц, может иметь место увеличение коэффициента теплоотдачи. В этом случае, как представляется авторам [179], конденсат под действием силы поверхностного натяжения стягивается к основанию зерна, пленка между зернами становится тоньше, уменьшается и средняя ее толщина на поверхности, что приводит к интенсификации теплоотдачи. Опыты проводились на двух рабочих веществах, хладоне-11 и 12. Результаты экспериментов показали, что на вертикальных трубах имеет место максимальная интенсификация теплообмена. В частности, при $\mathrm{Re} \approx 100$ наблюдалось десятикратное увеличение теплоотдачи. Характер теплообмена существенно отличается от того, что имеет место на трубах, свободных от засыпки. Обработка результатов показала, что $\mathrm{Nu}^* \sim \mathrm{Re}^{-1}$. Из данных, полученных на горизонтальных трубах, выяснили, что характер теплообмена ближе к тому, который имеет

место на трубах, свободных от зернистого материала, т.е. $Nu^* \sim Re^{-1/3}$ и степень интенсификации примерно вдвое меньше. Это отличие при разной ориентации труб можно объяснить «отсосом» части конденсата на вертикальной трубе от поверхности теплообмена в пористую среду.

Из параграфа 2.3. «Модифицирование стеклянных поверхностей».

В различных технических приложениях происходят процессы конденсации разнообразных паров, жидкость которых в одних случаях является смачивающей поверхности, на которых происходит фазовый переход и несмачивающей для поверхностей (например, гранулированные материалы), расположенных в непосредственном контакте с охлаждаемой поверхностью. Поведение сконденсированной фазы в условиях движения по охлаждаемой поверхности в порах из несмачиваемого материала оказывает влияние на закономерности теплообмена. Зозуля и Карху [27] (1969) рассматривали конденсацию пара на оребренных трубах, определяя высоту затопления межреберного пространства с учетом контактного угла смачивания в диапазоне 10–20°. Карху и Боровков [28] (1970) пренебрегали влиянием смачивания и получили другой результат анализа. Хижняков [95] (1971) рассматривал щелевую капиллярность и проводил попытку объяснения поведения конденсата в зависимости от геометрии ребер на процесс конденсации пара на оребренных трубах. Бреслер и Вайт [100] (1970) рассматривал смачивание поверхности с помощью капиллярных канавок. Риферт [99] (1984) определил зону затопления межреберных канавок в зависимости от контактного угла смачивания. Яу, Купер, Роуз [62] (1986) использовали тефлоновую дренажную ленту с контактным углом смачивания до 90° для удаления конденсата на горизонтальных оребренных трубах. Мухин, Накоряков и др. [173] (1985) показали, что смачиваемость поверхности уменьшает толщину пленки в режиме тонкой пленки. Влияние контактного угла смачивания при изменении его от 0 до 40° на теплообмен при конденсации на оребренных вертикальных трубах исследовали C. B. Panchal, K. J. Bell [57] (1980). Кэри, Микиц [48] (1973) сделали попытку проанализировать влияние термокапиллярного течения на теплообмен при пленочной конденсации на вертикальной поверхности на чередующихся по-

лосках из тефлонового несмачиваемого и металлического смачиваемого материала.

Перечисленные работы внесли определенный вклад в понимание процесса конденсации на поверхностях, помещенных в слой зернистого материала различной смачиваемости, однако анализа закономерностей теплообмена в указанных условиях не было сделано. Некоторыми исследователями высказывается только предположение, что несмачиваемый гранулированный материал, применительно к предложенной модели течения пленки на охлаждаемой поверхности в порах, может оказывать влияние на умеренное увеличению или уменьшение теплообмена при пленочной конденсации.

В связи с этим, автором решалась проблема получить закономерности теплообмена при пленочной конденсации в присутствие зернистых слоев, поверхности которых имеют контактный угол, отличный от нуля. Задача получения зернистого материала с поверхностью, плохо смачиваемой водой, была решена автором с использованием метода модифицирования поверхности, предложенной в [224].

Заметьте, в последнем примере после анализа приведено некоторое заключение о том, что анализ позволил автору выявить нерешенные вопросы (неустановленные зависимости), которые он решал. То есть обязательно в конце обзора вы должны сделать определенные выводы по нерешенным аспектам исследований, на которые следует обратить внимание или заняться их решением.

Рекомендуется по результатам этой домашней работы опубликовать статью в журнале или сделать доклад на конференции.

ДР 4. Разработка схемы экспериментального стенда с подбором измерительно-контролирующих приборов и различных устройств, методики эксперимента.

После того как автор принял решение о проведении экспериментальных исследований для решения неизученных вопросов (установления определенных зависимостей), необходимо:

- разработать гипотезу, подлежащую проверке;
- создать программы экспериментальных работ;
- определить способы и приемы вмешательства в объект исследования;
- обеспечить условия для осуществления процедуры экспериментальных работ;

- разработать пути и приемы фиксирования хода и результатов эксперимента;

- подготовить средства эксперимента (приборы, установки, модели и т.п.);

- обеспечить эксперимент необходимым обслуживающим персоналом.

Особое значение имеет правильная разработка методик эксперимента. Методика – это совокупность мыслительных и физических операций, размещенных в определенной последовательности, в соответствии с некоторой достигается цель исследования.

При разработке методик проведения эксперимента необходимо предусматривать:

- проведение предварительного целенаправленного наблюдения над изучаемым объектом или явлением с целью определения исходных данных (гипотез, выбора варьирующих факторов);

- создание условий, в которых возможно экспериментирование (подбор объектов для экспериментального воздействия, устранение влияния случайных факторов);

- определение пределов измерений;

- систематическое наблюдение за ходом развития изучаемого явления и точные описания фактов;

- проведение систематической регистрации измерений и оценок фактов различными средствами и способами;

- создание повторяющихся ситуаций, изменение характера условий и перекрестные воздействия, создание усложненных ситуаций с целью подтверждения или опровержения ранее полученных данных;

- переход от эмпирического изучения к логическим обобщениям, к анализу и теоретической обработке полученного фактического материала.

Правильно разработанная методика экспериментального исследования предопределяет его ценность. Поэтому разработка, выбор, определение методики должно проводиться особенно тщательно. При определении методики необходимо использовать не только личный опыт, но и опыт товарищей и других коллективов.

Перед каждым экспериментом составляется его план (программа), который включает: цель и задачи эксперимента; выбор варьирующих факторов; обоснование объема эксперимента, числа опытов; порядок реализации опытов, определение последовательности изменения факторов; выбор шага изменения факторов, задание интервалов между будущими экспериментальными точками; обоснование средств измерений; описание проведения эксперимента; обоснование способов обработки и анализа результатов эксперимента.

Приведем выдержку из диссертации А.Р. Богомолова как пример (параграф 2.2. «Исследования теплообмена при фазовом превращении»).

Стенд и методика исследования. Для исследования теплообмена при конденсации пара на гладкой трубе и трубе, помещенной в зернистый слой, использовался автоматизированный стенд, схема которого представлена на рис. 2.2.1.

Корпус стенда состоял из двух цилиндрических емкостей, расположенных под углом друг к другу полостей, играющих роль кипятильника *19* и конденсатора *23*. В конденсаторе было установлено два опытных (рабочих) участка *8* и *9*. Отвод тепла при конденсации пара от участков проводился охлаждающей водой, поступающей из магистрали через бак постоянного уровня *1*, регулировку и измерение расхода ее осуществляли с

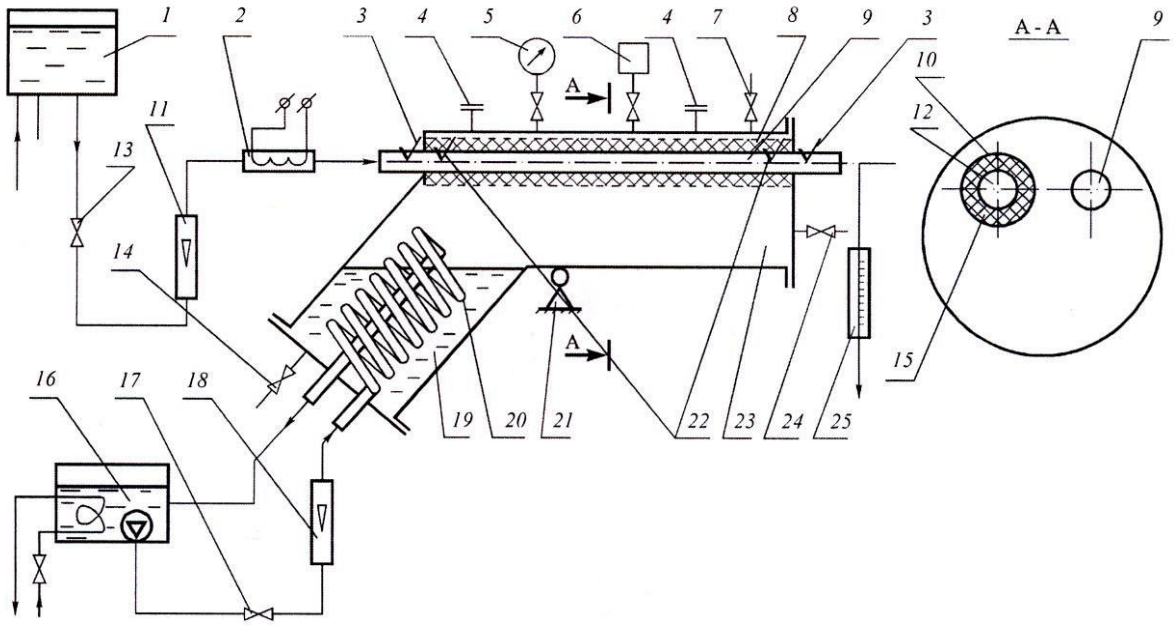

Рис. 2.2.1. Схема экспериментальной установки:
1 – бак постоянного уровня; *2* – подогреватель; *3, 22* – термопары; *4* – штуцера для вывода термопар; *5* – манометр; *6* – датчик давления “Сапфир”; *7, 13, 14, 17, 24* – вентили; *8* – рабочий участок; 9 – контрольная труба; *10* – сетка; *11, 18* – ротаметры; *12* – рабочая труба; *15* – зернистый слой; *16* – термостат с насосом; *19* – кипятильник; *20* – змеевик; *21* – шарнирная опора; *23* – конденсатор; *25* – расходомер

помощью вентиля *13* и ротаметра *11*, температуру охлаждающей воды изменяли в подогревателе *2*. Дополнительно производили контрольные измерения расхода охлаждающей воды емкостным расходомером *25*.

Энергообеспечение стенда осуществлялось двумя способами: 1) при конденсации паров хладонов R113 и R227 – путем пода-

чи нагретой воды из снабженного насосом термостата *16*. Регулировка и контроль постоянства расхода греющей воды осуществляется с помощью вентиля *17* и ротаметра *18*. Кипятильник и конденсатор были снабжены вентилями *7, 14* и *24* для вакуумирования емкости и заполнения ее рабочим веществом. Змеевик кипятильника был изготовлен из нержавеющей тонкостенной трубки с диаметром сечения 10 мм и общей площадью обогрева около 0,1 м^2. Выводы змеевика были вварены в крышку кипятильника и составляли с ней единое целое; 2) при конденсации водяного пара – змеевиковый нагреватель кипятильника заменялся электрическим нагревателем мощностью 6 кВт. Мощность нагревателя регулировалась реостатом, позволяющим плавно изменять нагрев для генерации водяного пара.

Кипятильник и конденсатор имели диаметр 100 мм, снабжены крышками и уплотнительными устройствами для вывода рабочего и контрольного (гладкая труба без засыпки) участков и шарнирной опорой *21*, на которой кипятильник и конденсатор с рабочими участками могли устанавливаться под любым углом к горизонту.

Для визуального наблюдения за процессами, происходящими в конденсаторе и кипятильнике, в их боковые стенки было вмонтировано по два смотровых окна, изготовленных из кварцевого стекла.

После сборки емкости конденсатора и кипятильника установка испытывалась пробным давлением 2 МПа.

Рабочий участок (рис. 2.2.2) состоял из медной трубки *1* наружным диаметром 8 мм и длиной 400 мм, на которую был надет чехол *2* из нержавеющей сетки, закрытой с торцов заглушками *4*. В полость между чехлом и трубкой засыпался зернистый слой *3*, состоящий из стеклянных шариков. В экспериментах были использованы слои из частиц диаметром 0,8, 1,1 и 3,2 мм.

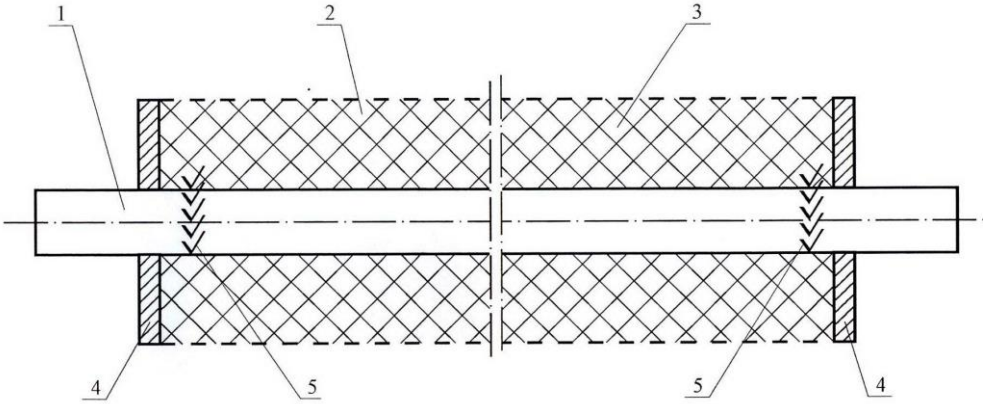

Рис. 2.2.2. Рабочий участок:
1 – медная трубка; *2* – сетка; *3* – зернистый слой; *4* – заглушки; *5* – термопары

Для измерения температуры стенки трубки в двух ее сечениях были закреплены по 5 хромель-копелевых термопар 5. Контрольный участок (гладкая труба без засыпки), представлял собой такую же, как и в рабочем участке, медную трубку с закрепленными на ней термопарами.

Подогреватель охлаждающей воды был изготовлен из медной трубы наружным диаметром 15 мм и длиной 1,2 м, на поверхность которой через слюдяную электроизоляционную прокладку был намотан нихромовый электронагреватель мощностью до 2 кВт. Регулировка мощности нагревателя осуществлялась путем подачи на него питания через автотрансформатор, а замер и контроль постоянства подаваемой энергии производили с помощью вольтметра и амперметра, включенных в цепь нагревателя.

Остальные узлы и детали стенда, такие как термостат, вентили, баки и т.д. представляли собой стандартные или общепринятые изделия.

Все детали стенда, соприкасающиеся с рабочей средой, были изготовлены из нержавеющей стали или из материалов, не вступающих во взаимодействие с ней.

Кипятильник, конденсатор и подогреватель были тщательно теплоизолированы. Для исключения теплообмена через стенки конденсатора использовался охранный нагреватель, который нагревал стенки конденсатора до температуры, равной температуре насыщенного пара в конденсаторе. Перед запуском стенда в работу, его заполняли рабочей жидкостью. Заправка стенда рабочим веществом осуществлялась так, чтобы избежать попадания в рабочий объем конденсатора неконденсирующихся примесей в случае использования хладонов и удаление таких примесей методом мгновенного вскипания в случае использования дистиллированной воды, т.е. необходимо провести мероприятия, которые бы обеспечили полное удаление воздуха и растворенных в воде газов из рабочего объема. Даже небольшие неучтенные концентрации неконденсирующихся примесей в рабочем объеме могут привести к серьезным ошибкам в изучении процесса.

Исходя из этого, заправку стенда рабочей жидкостью (хладонами) производили следующим образом. Перед заправкой рабочий объем вакуумировали ($P_{\text{îñò}} < 0{,}1$ Па), после чего в змеевик кипятильника и трубки конденсатора подавали холодную, а в змеевик ресивера, в котором хранился хладон – горячую во-

ду. Хладон в ресивере вскипал, и образовавшийся пар по трубе, соединяющей ресивер и рабочий объем, поступал в конденсатор и кипятильник, где конденсировался на трубах. Весь рабочий объем заполнялся жидкой фазой, причем в процессе заполнения часть паровой фазы периодически сдувалась через вентиль, находящийся в верхней точке стенда. Сдувку производили до тех пор, пока из верхнего вентиля не появлялся жидкий хладон. После этого верхний вентиль стенда подключался к ресиверу и паровой фазой подкачивался в него. Для создания перепада давления в змеевик ресивера подавали холодную воду, а в змеевик кипятильника – горячую. Таким образом, жидкость выпаривалась из рабочего объема до уровня, необходимого для работы стенда.

В случае заправки стенда дистиллированной водой, после вакуумирования также заполняли ей весь рабочий объем. Сливали небольшую часть воды через нижний вентиль. После этого при герметично зарытых вентилях производили нагрев воды до состояния кипения. Быстрым открытием верхнего вентиля производили процесс мгновенного вскипания. Эту процедуру повторяли такое количество раз, чтобы обеспечить надежное удаление растворенных неконденсирующихся примесей в воде.

Работа стенда осуществлялась следующим образом. После заполнения кипятильника жидким рабочим веществом до нужного уровня в змеевик кипятильника из термостата *10* (в случае с хладоном) подавалась греющая (в случае с водой включали электронагреватель), а в рабочий или контрольный участок – охлаждающая вода с заданным расходом и температурой. Расход греющей воды устанавливался с помощью вентиля *11* и ротаметра *12*, а расход охлаждающей воды регулировался вентилем *6* и измеряли ротаметром *7*. Температура устанавливалась с помощью встроенного нагревателя в термостате *10* (в случае с хладонами) для греющей и подогревателя *8* для охлаждающей воды. В случае с дистиллированной водой температура в рабочем объеме устанавливалась с помощью нагревателя, установленного в кипятильнике вместо змеевика. За счет подведенного тепла на поверхности кипятильника происходило вскипание жидкости, и образовавшийся пар попадал в конденсатор *2*, конденсировался на охлаждаемой трубке рабочего или контрольного участка, полученный конденсат вновь стекал в кипятильник. После достижения установившегося режима проводили необходимые измерения.

Для контроля правильности проводимых измерений перед основными опытами проводились эксперименты на контрольном участке. Результаты данных опытов сравнивались с данными других авторов.

Методика измерений. В процессе экспериментальных исследований производили измерения следующих параметров:

- температуру охлаждающей воды на входе и выходе из рабочего или контрольного участка хромель-копелевыми термопарами;
- температуру стенки рабочего или контрольного участка при помощи десяти хромель-копелевых термопар, зачеканенных в двух сечениях трубки;
- давление в рабочем объеме конденсатора датчиком давления «Сапфир» и образцовым манометром кл. 0,15;
- расход охлаждающей жидкости с помощью индивидуального ротаметра РС-5 с контрольной проверкой расхода объемным методом;
- угол наклона рабочего участка к горизонту определялся с помощью катетометра В-630.

Данные измерения позволили рассчитать температуру насыщения T_s по *P-T* зависимости; среднюю температуру стенки трубы как среднюю арифметическую температуру стенки трубы в десяти точках; плотность теплового потока q, Вт/(м^2·К) по изменению энтальпии воды; температурный напор ΔT, как разницу между температурой стенки $T_{\text{ñò}}$ и температурой насыщения T_s; коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке трубы α, Вт/м^2.

Кроме того, с целью контроля постоянства параметров, измеряли температуру и расход греющей воды, напряжение и силу тока в цепи электроподогревателя охлаждающей воды и кипятильника.

Для измерения температуры стенки трубки использовали термопары, изготовленные из сваренных одним концом хромелевых и копелевых проводов диаметром сечения 0,1 мм. После сварки провода электроизолировали, наматывая на них фторопластовую пленку толщиной 10 мкм. Затем термопары заделывались в стенку трубки. Схема заделки термопар представлена на рис. 2.2.3. Спай *4* термопары укладывался в специально профрезерованный паз в стенке *1* трубки и зачеканивался заранее пролуженной медной проволокой *5*, имеющей несколько больший диаметр, чем глубина и ширина паза. После зачеканки

проволока стачивалась и тщательно зачищалась заподлицо со стенкой. Термопары для измерения температуры охлаждающей воды устанавливали в термокарманы. Холодные спаи термопар помещались в сосуд Дьюара, заполненный тающим льдом. Все термопары индивидуально тарированы, для чего горячие их спаи помещали в специальные термокарманы, вмонтированные в медную массивную болванку, которая помещалась в термостат, заполненный водой. Температуру воды измеряли жидкостными термометрами с ценой деления 0,1 °С. Ступенчато изменяя температуру воды, омывающей болванку, снимали показания термометров м напряжение термоЭДС термопар, которое измерялось цифровым прибором Ф-30. Полученные данные обрабатывали в виде графиков зависимости термоЭДС от температуры и в виде полиномов различной степени. Отклонение тарировочных данных всех термопар, использованных в экспериментах, от стандартных данных не превышало 1,1 %.

Температуру пара в конденсаторе определяли с помощью измерения давления насыщения образцовым манометром кл. 0,15 и электронным датчиком давления типа «Сапфир» с последующим расчетом температуры по *P-T* зависимости рабочего вещества.

Основная задача измерений состояла в определении теплового потока и температурного напора. Эти параметры позволяли вычислить коэффициент теплоотдачи по зависимости (2.2.1). Удельный тепловой поток определялся по изменению энтальпии охлаждающей воды

$$q = \frac{c_p G_{\text{в}} \Delta t_{\text{в}}}{F}, \qquad (2.2.2)$$

где c_p – теплоемкость охлаждающей воды; $G_{\text{в}}$ – массовый расход охлаждающей воды; $\Delta t_{\text{в}}$ – температурный перепад между входом и выходом охлаждающей воды; F – поверхность конденсации трубки.

Температура стенки трубки определялась по осредненным показаниям всех хромель-копелевых термопар, зачеканенных в стенку по периметру и образующей трубки.

Выбор рабочего вещества. От вида рабочего вещества зависит выбор конструкции установки, возможные диапазоны проводимых исследований, точность эксперимента, трудоемкость и др.

В данной работе в качестве рабочих веществ использовались хладоны R113 и R227, а также дистиллированная вода. Хладон

R227 обладает теми же преимуществами, что и традиционно используемые для проведения экспериментов: R12, R22, R13 и т.д. Однако, в отличие от последних, хладон R227 не содержит хлора и, следовательно, не оказывает вредного воздействия на озонный слой атмосферы.

По сравнению с другими веществами хладоны обладают следующими преимуществами:

- при комнатной температуре и выше в условиях равновесия хладон R227 всегда находится при избыточном давлении, что исключает попадание воздуха из атмосферы в установку;
- жидкий хладон почти не растворяет в себе воздух и плохо смешивается с водой. Эти его свойства позволяют легко избавиться от примесей;
- удельная теплота парообразования у хладона R227 на порядок меньше, чем у воды и аммиака. Это позволяет при сравнительно небольших энергозатратах получить высокие массовые расходы пара, что является существенным фактором при исследовании теплообмена при конденсации движущегося пара;
- плотность пара хладона R227 существенно больше плотности водяного пара, аммиака, но на порядок меньше плотности хладона R13 и почти не имеет отличия от хладона R22. При небольших тепловых и температурных напорах нет заметного влияния движения его на пленку конденсата;
- коэффициент теплопроводности жидкого хладона R227 на порядок меньше, чем у воды и аммиака и почти не отличается от хладонов R13 и R22.

Использование в качестве рабочего вещества хладона R227 имеет и недостатки. Наличие большого давления в контуре (5-20 атм.) значительно усложняет конструкцию узлов установки. Большое давление делает трудоемкими процессы монтажа экспериментальных участков, демонтажа и профилактических ремонтов. Хладон – сильный растворитель, поэтому в качестве уплотнений и электроизоляционного материала для линии измерительных систем, можно было использовать в основном фторопласт.

Использование в качестве в качестве рабочего вещества воды в экспериментальных исследованиях предопределено распространенностью применения ее в различных процессах и технологиях промышленности (теплообмен, абсорбция, экстракция, сушка и др.). Кроме того, краевой угол смачивания воды на

различных поверхностях контактных устройств тепломассообменных аппаратов имеет достаточно широкий диапазон изменения (от практически полного смачивания до 90°). Однако расчетные зависимости основаны на допущениях полного прилипания на стенках поверхностей. Вода является хорошим рабочим веществом для исследования влияния краевого угла смачивания на закономерности гидродинамических и тепломассообменных процессов, которые распространены в различных отраслях техники. В случае значительного влияния этого фактора могут быть уточнены расчетные методики для инженерной практики.

Теплофизические свойства хладона R227 были определены в Институте теплофизики СО РАН.

Автоматизация сбора и обработки информации. Сбор и обработка экспериментальных данных производились с помощью измерительно-вычислительного комплекса (ИВК), включающего в себя компьютер с процессором Intel Pentium 100, печатающее устройство, приборы Ф-30 с цифровым выходным сигналом измеряемой величины и входом управления, коммутатор на герконовых реле и контроллера, обеспечивающего связь компьютера с периферийными устройствами. За основу была принята схема ИВК, разработанная Институтом теплофизики СО РАН. Схема ИВК представлена на рис. 2.2.4.

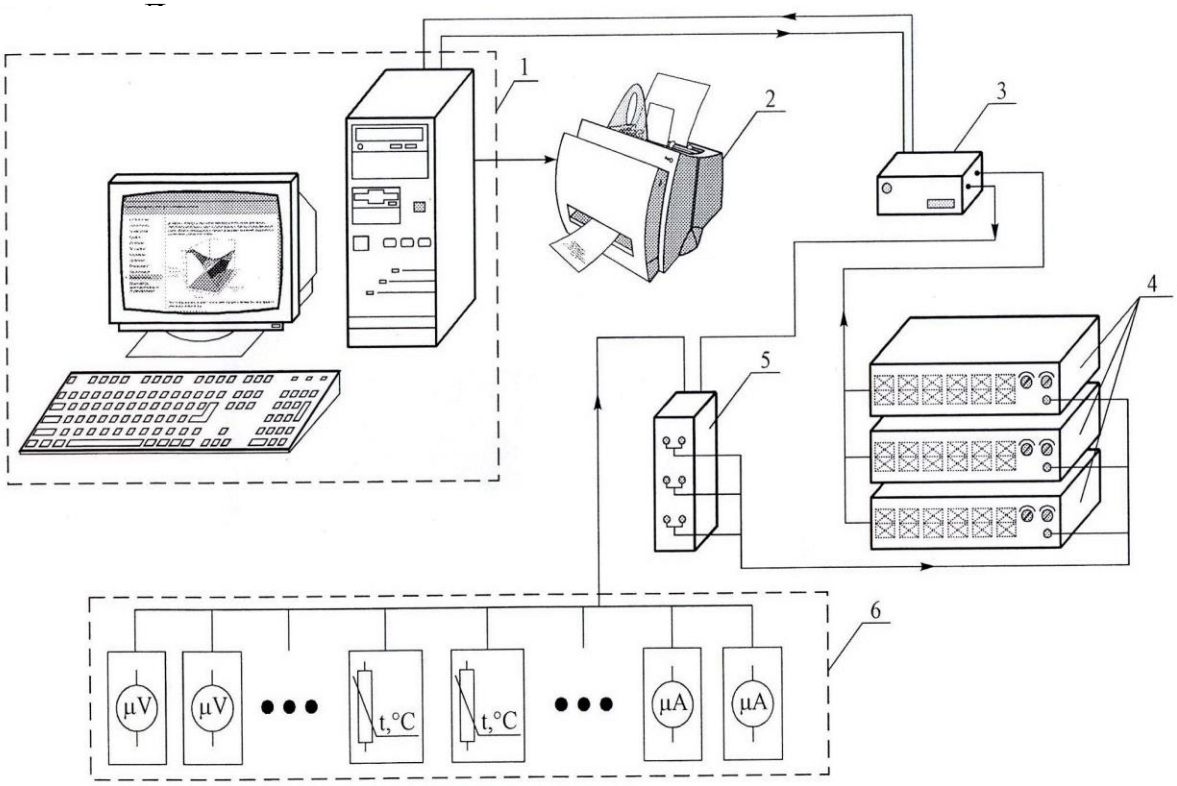

Рис. 2.2.4. Схема ИВК:
1 – персональная ЭВМ; *2* – контроллер; *3* – коммутатор; *4* – цифровые приборы; *5* – датчики измерения давления, температуры и расхода

оматизированного измерения на стенде, схема была дополнена необходимыми устройствами для выполнения конкретных задач проводимого эксперимента. При проведении опытов требовалось обеспечить измерение сигналов от датчиков температур, давлений и расходов. Измерения проводились следующим образом. Сигналы с датчиков *5* через коммутатор *3* поступали на цифровые приборы *4*, подключенные к вычислительные машины через контроллер *2*. Результаты измерений считывались и обрабатывались ЭВМ. Управление коммутатором осуществлялось по заданной программе ЭВМ. Все датчики имели индивидуальные тарировочные характеристики, которые хранились в памяти ЭВМ.

Программное обеспечение выполнено на языке Turbo Pascal 7.0. Программа выполняла следующие функции: 1) опрос датчиков в заданной последовательности; 2) вычисление основных параметров, характеризующих теплообмен; 3) обработка и представление экспериментальных данных в заданной форме; 4) сравнение полученных опытных данных с теоретическими зависимостями. Результаты эксперимента выводились на экран дисплея в виде таблиц и графиков. Применение ИВК позволило опрашивать датчики, по их сигналам вычислять значения измеренных величин и все необходимые параметры, характеризующие процесс. Это позволяло оперативно, непосредственно во время проведения опытов, принимать решения о воздействии на процесс с целью дальнейшего хода эксперимента.

Автоматизация эксперимента позволила увеличить темп проведения опытов и повысить достоверность полученных результатов.

Контрольная работа для аспирантов заочной формы обучения

При решении задач необходимо приводить весь ход решения и математические преобразования. Решения задач сопровождать рисунками, краткими пояснениями и подробными вычислениями. При вычислении какой-либо величины нужно словами указать какую величину определяют и по какой формуле, на основе каких уравнений или законов. Записав формулу в общем виде и пояснив все входящие в нее величины, подставляют их численные значения, и затем результат вычислений. При записи заданных и полученных величин обязательно следует указывать единицы их измерения в системе СИ.

Контрольную работу выполняют в ученической тетради, в которой необходимо оставить поля для замечаний преподавателя. Условия задачи переписывают полностью, соблюдая последовательность, указанную в кон-

трольном задании. В конце работы следует указать список использованной литературы.

Контрольная работа аспирантов заочной формы включает 4 задачи по тепломасоообмену.

Задача 1. Определить коэффициент теплопередачи шахматного пучка стальных ребристых труб. Диаметр труб 16/14 мм. Оребрение стальное спиральное наружное. Толщина ребер 0,5 мм; шаг ребер 2 мм; высота ребер 2,5 мм. Скорость воды в трубах 0,5 м/с. Скорость воздуха в узком сечении пучка 5 м/с. Обтекание пучка поперечное. Рабочая длина труб 1,3 м; количество рядов труб по ходу воздуха z=3; поперечный шаг труб s_1=26 мм; продольный шаг труб s_2=24 мм.

Задача 2. В насадочном абсорбере производится поглощение пара метилового спирта водой из газа под атмосферным давлением при средней температуре 27°С. Содержание метилового спирта в газе, поступающем в скруббер, 100 г на 1 м^3 инертного газа (считая объем газа при рабочих условиях). На выходе из скруббера вода имеет концентрацию 67% от максимально возможной, т. е. от равновесной с входящим газом. Уравнение растворимости метилового спирта в воде в относительных мольных концентрациях: $Y^* = 1{,}15X$. Извлекается водой 98% от исходного количества спирта. Коэффициент массопередачи: K_x = 0,5 кмоль спирта/(м$^2 \cdot$ ч $\cdot$ (кмоль спирта/кмоль воды)). Расход инертного газа 1200 м^3/ч (при рабочих условиях). Абсорбер заполнен насадкой из керамических колец с удельной поверхностью 190 м^2/м^3. Коэффициент смачивания насадки Ψ = 0,87. Фиктивная скорость газа в абсорбере ω = 0,4 м/с. Определить расход воды и требуемую высоту слоя насадки.

Задача 3. Определить необходимое число тарелок в ректификационной колонне периодического действия для разгонки смеси хлороформ – бензол под атмосферным давлением. Исходная смесь содержит 38% (мол.) хлороформа, дистиллят должен содержать 97% (мол.), кубовый остаток после перегонки – 10% (мол.). Коэффициент избытка флегмы 2. Данные о равновесных составах взять из справочника. На одну ступень изменения концентрации приходится 1,4 тарелки.

Задача 4. В работе находится теоретическая сушилка с рециркуляцией части отработанного воздуха. Расход свежего атмосферного воздуха L = 2 кг/с, его энтальпия I_0 = 60 кДж/кг, парциальное давление водяного пара в нем $p_{п0}$ = 1600 Па. Начальная влажность материала ω_1 = 0,6, конечная ω_2 = 0,06. В калорифере воздушная смесь нагревается с влагосодержанием $x_{0см}$ = 0,05 от температуры $t_{0см}$ = 45 ^{0}С до температуры $t_{1см}$ = 90 °С. Коэффициент теплопередачи в калорифере k = 50 Вт/(м^2·К). Абсолютное давление греющего водяного пара $P_п$ = 0,35 МПа. Определить производи-

тельность по высушенному материалу G, поверхность нагрева калорифера F и долю возвращаемого воздуха на сушку в калорифер.

ФОРМЫ И СРОКИ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

Текущий контроль успеваемости и промежуточная аттестация проводятся с использованием фонда оценочных средств. Оценочными средствами промежуточной аттестации являются вопросы к экзамену. Оценочными средствами текущего контроля для студентов очной формы обучения на 4, 8, 12 и 16 неделях на лекционных занятиях является опрос в письменной или устной форме, на практических занятиях – решенные задачи, самостоятельной работы – выполненные домашние работы. Кроме того к оценочным средствам самостоятельной работы студентов заочной формы обучения относится контрольная работа.

Ниже представлено описание содержания оценочных средств контроля.

ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Общие проблемы теории теплофизики и теоретической теплотехники, основные направления ее развития.
2. Уравнение сохранения энергии, закон Фурье, краевые условия задач теплопроводности.
3. Механизм теплопроводности веществ в твердом (кристаллическом и аморфном), жидком и газообразном состояниях.
4. Теплопроводность через плоскую стенку. Число Био. Коэффициент теплопередачи.
5. Теплопроводность через цилиндрическую стенку, критический диаметр изоляции.
6. Нестационарное температурное поле в плоской пластине, регулярный режим охлаждения (нагревания) тел. Метод перемножения решений.
7. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии в сплошной среде.
8. Эмпирические законы переноса (Ньютона, Фурье, Фика). Приведение уравнений к безразмерному виду, критерии подобия.
9. Физический смысл чисел подобия конвективного тепло- и массообмена. Тройная аналогия.
10. Система уравнений теплового пограничного слоя. Анализ теплообмена при ламинарном течении в пограничном слое методами размерностей. Автомодельное решение Польгаузена.
11. Соотношения для расчета теплообмена при различных числах Прандтля. Условные толщины пограничного слоя.

12. Интегральные уравнения импульса и энергии.

13. Переход ламинарного течения в турбулентное, влияние на турбулентный переход параметров набегающего потока, массовых сил, характеристик обтекаемой поверхности. Теоретические и экспериментальные аспекты перехода ламинарного течения в турбулентное.

14. Осредненные уравнения движения и энергии для турбулентного течения. Кажущиеся напряжения турбулентного трения, турбулентный тепловой поток. Структура пристенной турбулентной области.

15. Аналогия Рейнольдса для теплообмена при турбулентном течении в пограничном слое, ее модернизированный вариант (двухслойная схема), расчетные соотношения для теплоотдачи.

16. Конвективный теплообмен при высоких скоростях течения. Адиабатическая температура стенки, коэффициент восстановления, методы расчета теплоотдачи.

17. Теплообмен на проницаемой поверхности.

18. Теплообмен при поперечном обтекании одиночного цилиндра и пучков труб.

19. Теплообмен при течении жидкости в каналах. Математическое описание, среднемассовая скорость и температура.

20. Стабилизированный теплообмен при граничных условиях 2-го рода. Профили скорости, температуры, теплового потока при ламинарном и турбулентном течении, интеграл Лайона.

21. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном термическом участке круглой трубы. Начальный гидродинамический участок.

22. Стабилизированный теплообмен при ламинарном течении.

23. Стабилизированный теплообмен при турбулентном течении, результаты исследований для неметаллических жидкостей и жидких металлов, расчетные формулы.

24. Влияние переменности свойств жидкости на теплообмен при течении капельных жидкостей и газов в трубах.

25. Теплообмен при свободной конвекции. Механизм и математическое описание, приближение Буссинеска. Развитие пограничного слоя на вертикальной плоской поверхности, расчет коэффициента теплоотдачи.

26. Свободная конвекция на поверхности горизонтального цилиндра и сферы.

27. Свободная конвекция в замкнутых объемах; теплопередача через прослойку.

28. Теплообмен при фазовых превращениях. Математическое описание и модели двухфазных сред. Универсальные условия совместности на межфазных границах.

29. Специальные условия совместности для процессов тепло- и массообмена. Неравновесность на межфазных границах, квазиравновесное приближение.

30. Теплообмен при пленочной конденсации на вертикальной поверхности: решение Нуссельта, анализ основных допущений. Конденсация на поверхности горизонтального цилиндра.

31. Конденсация движущегося пара. Качественные закономерности капельной конденсации.

32. Кипение жидкостей. Условия зарождения парового зародыша в объеме перегретой жидкости и на твердой поверхности нагрева. Основные закономерности роста и отрыва паровых пузырьков.

33. «Кривая кипения». Теплообмен при пузырьковом кипении в большом объеме, теплообмен при пленочном кипении. Кризисы кипения в большом объеме.

34. Режимы течения двухфазных потоков в трубах. Характер изменения среднемассовой температуры жидкости, температуры стенки, расходного массового паросодержания по длине обогреваемого канала.

35. Кипение жидкости, недогретой до температуры насыщения. Кризис теплоотдачи при кипении в трубах.

36. Совместные процессы тепло- и массопереноса. Общая характеристика процессов переноса массы и энергии. Состав смеси, диффузионные потоки, коэффициент диффузии. Перенос энергии и импульса в смеси.

37. Аналогия процессов тепло- и массообмена. Расчет интенсивности переноса энергии и массы компонента при умеренных и высоких скоростях массообмена.

38. Тепло- и массообмен при химических превращениях. Диффузия, сопровождаемая гомогенной или гетерогенной химической реакцией.

39. Процессы на поверхности тела, обтекаемого гиперзвуковым потоком газа.

40. Сублимация поверхности тела, обтекаемого высокотемпературным газовым потоком. Коэффициент аккомодации. Зависимость скорости сублимации от температуры поверхности тела.

41. Термическое разложение тела, обтекаемого высокотемпературным потоком химически активного газа. Химическое взаимодействие на поверхности тела, обтекаемого высокотемпературным газовым потоком.

42. Разрушение композиционных материалов в высокотемпературном газовом потоке. Взаимодействие процессов горения и испарения.

43. Теплообмен излучением. Основные понятия и законы излучения. Природа излучения. Интегральная и спектральная плотности потока излучения.

44. Поглощательная, отражательная и пропускательная способности тел. Абсолютно черное тело.

45. Законы теплового излучения (Планка, Вина, Стефана-Больцмана, Кирхгофа, Ламберта).

46. Излучение реальных тел. Радиационные свойства реальных материалов.

47. Теплообмен излучением в поглощающих и излучающих средах. Излучение и поглощение в газах.

48. Основной закон переноса энергии излучения в излучающе-поглощающей среде. Собственное излучение газа.

49. Методы расчета теплообмена.

50. Современные теплообменные системы: парогенераторы тепловых электрических станций, ядерные энергетические реакторы, камеры сгорания ракетных двигателей, бланкет термоядерного реактора.

51. Теплообменные аппараты: рекуперативные, регенеративные, смесительные.

52. Проникающее охлаждение. Эффект вдува. Теплообмен между пористой матрицей и фильтрующимся охладителем.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОПРОСА

К письменному опросу по лекционному материалу по вопросам студенты готовятся самостоятельно, используя материал из рекомендуемых источников литературы и выданный на лекциях преподавателем.

Письменный опрос 1

1. Что называется конвективным теплообменом, сложным теплообменом?
2. Вывод дифференциального уравнения теплопроводности.
3. Вывод уравнения теплопроводности через многослойную цилиндрическую стенку.
4. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии в сплошной среде.
5. Тройная аналогия.

Письменный опрос 2

1. Что такое гидродинамический и тепловой пограничные слои?
2. Каков механизм передачи теплоты при ламинарном и турбулентном движении жидкости?
3. Напишите систему дифференциальных уравнений для конвективного теплообмена.
4. Назовите три теоремы подобия.
5. Опишите подробно характер обтекания пучков труб при поперечном движении жидкости.

Письменный опрос 3

1. При каких условиях возникают процессы фазового перехода?
2. Как влияют примеси газа на теплоотдачу при конденсации?
3. Расскажите, что такое кризисы кипения.
4. Поясните как происходит перенос энергии и импульса в смесях.

5. В чем заключается аналогия процессов тепло- и массообмена? Поясните на примере.

Письменный опрос 4

1. Назовите и поясните законы излучения.
2. Расскажите о теплообмене излучением в топках.
3. Изобразите графики изменения температуры рабочих жидкостей в аппаратах с прямотоком и противотоком.
4. Вывод уравнения среднелогарифмического температурного напора для аппаратов с прямотоком.
5. Тоже с противотоком.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кудинов, А. А. Гидрогазодинамика: учеб. пособие / А. А. Кудинов. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 336 с.

2. Богомолов, А. Р. Теория, примеры и задачи по расчету тепломассообменного оборудования предприятий. Ч. 1 [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Р. Богомолов, Е. Ю. Темникова. – Кемерово, 2012. – 180 с. – Режим доступа: http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90568&type=utchposob:common

3. Богомолов, А. Р. Теория, примеры и задачи по расчету тепломассообменного оборудования предприятий. Ч. 2 [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А. Р. Богомолов, Е. Ю. Темникова. – Кемерово, 2012. – 119 с. – Режим доступа: http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90569&type=utchposob:common

4. Теплотехника: учебник / А. П. Баскаков [и др.]; под ред. А. П. Баскакова. – М.: БАСТЕТ, 2010. – 328 с.

5. Шиляев, М. И. Интенсификация тепломассообмена в дисперсных средах при конденсации и испарении: монография / М. И. Шиляев, Е. М. Хромова, А. Р. Богомолов. – Томск: ТГАСУ, 2010. – 272 с.

6. Черняк, В. Г. Механика сплошных сред [Электронный ресурс] / В. Г. Черняк, П. Е. Суетин. – М.: Физматлит, 2008. – 353 с. – Режим доступа: http://www.biblioclub.ru/book/69276/.

7. Цветков, Ф. Ф. Задачник по тепломассообмену: учеб. пособие / Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов, В. И. Величко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 196 с.

8. Примеры и задачи по тепломассообмену [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В. С. Логинов [и др.]. – СПб.: Лань, 2011. – 256 с. Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=1553.

9. Цветков, Ф. Ф. Тепломассообмен: учеб. пособие для вузов / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьева. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 550 с.

10. Основы теплотехники и энергосбережения: учеб. пособие / П. Т. Петрик, Ю. О. Афанасьев, А. Р. Богомолов, И. В. Дворовенко; под

ред. П. Т. Петрика; ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2006. – 244 с. http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90128&type=utchposob:common

11. Теория тепломассообмена: учебник для вузов / С. И. Исаев, И. А. Кожинов, В. И. Кофанов [и др.]; под ред. А. И. Леонтьева. – М.: Высш. школа, 1979. – 495 с.

12. Телегин, А. С. Тепломассоперенос: учебник для вузов / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.

13. Промышленные тепломассообменные процессы и установки: учебник для вузов / А. М. Бакластов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.

14. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981 – 416 с.

15. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1983 – 552 с.

16. Аникеев, А. А. Основы вычислительного теплообмена и гидродинамики: учеб. пособие / А. А. Аникеев, А. М. Молчанов, Д. С. Янышев. – М.: ЛИБРОКОМ, 2010. – 152 с.

17. Гухман, А. А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена: процессы переноса в движущейся среде: учеб. пособие / А. А. Гухман. – М.: ЛКИ, 2010. – 328 с.

18. Цирельман, Н. М. Теория и прикладные задачи тепломассопереноса: учеб. пособие / Н. М. Цирельман. – М.: Машиностроение, 2011. – 503 с.

19. Лыков, А. В. Тепломассообмен: справочник / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 479 с.

20. Кутателадзе, С. С. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 320 с.