

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова»

Н.В. Смолина, Э.Н. Сабуров

**ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ
ЧИСТОГО ПАРА И КИПЕНИИ
ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ**

Учебное пособие

Архангельск
САФУ
2018

УДК 621.175.81, 66.046.7
ББК 31.31
С51

*Рекомендовано к изданию учебно-методическим советом
Северного (Арктического) федерального университета
имени М.В. Ломоносова*

Рецензенты: доктор технических наук, профессор, заслуженный
работник высшей школы **Н.И. Шестаков**,
кандидат технических наук **А.В. Самородов**

Смолина, Н.В.

С51 Теплообмен при конденсации чистого пара и кипении одно-
компонентных жидкостей: учебное пособие / Н.В. Смолина,
Э.Н. Сабуров; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. – Архангельск:
САФУ, 2018. – 94 с.
ISBN 978-5-261-01354-9

В пособии рассмотрены основы теории теплообмена при конденса-
ции чистого пара и кипении однокомпонентных жидкостей. Пред-
лагаются вопросы и задачи для самостоятельной работы при подго-
товке к семинарам и практическим занятиям.

Предназначено для студентов II курса высшей школы энергетики,
нефти и газа (направление подготовки 13.03.01 – «Теплоэнергетика и
теплотехника», профили подготовки «Промышленная энергетика» и
«Энергообеспечение предприятий») очной и заочной форм обучения.

УДК 621.175.81, 66.046.7
ББК 31.31

ISBN 978-5-261-01354-9 © Смолина Н.В., Сабуров Э.Н., 2018
© Северный (Арктический) федеральный
университет им. М.В. Ломоносова, 2018

ПРЕДИСЛОВИЕ

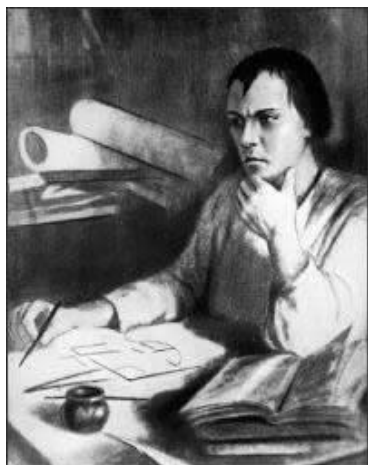
В начале XVIII века в промышленности появились и начали интенсивно развиваться паровые машины. Первая отечественная огнетехническая двухцилиндровая паровая машина была создана примерно в это же время выдающимся русским инженером-теплотехником Иваном Ивановичем Ползуновым (1728–1766 гг.). И.И. Ползунов подготовил проект «огнедействующей машины» и вручил его начальнику Колывано-Воскресенских заводов. Проект был поддержан и направлен на одобрение в Петербург, где после предварительного рассмотрения был представлен Екатерине II, которая оценила его в высшей степени положительно. Машина И.И. Ползунова была создана, но в связи со смертью изобретателя проработала всего три месяца. Сам факт создания паровой машины имел исключительно важное историческое значение. Огромная значимость работы И.И. Ползунова состоит и в том, что в пояснительной записке к проекту автор дал первое научное описание процесса парообразования и теплообмена при кипении жидкости, полученное им в результате специальных наблюдений, грамотно сформулировал передовые воззрения на природу теплоты.

В связи с развитием промышленности начинает повышаться уровень теплотехники. Военный флот России постепенно становится паровым. Всё это вызывает необходимость создания теории паровых котлов, дальнейшего развития теории теплообмена. Появляются выдающиеся работы Ильи Павловича Алымова (1831–1884 гг.), Ивана Алексеевича Вышнеградского (1831–1895 гг.), Николая Николаевича Божерянова (1811–1876 гг.), Николая Павловича Петрова (1836–1920 гг.), Карла Васильевича Кирша (1877–1919 гг.), Николая Игнатьевича Гриневецкого (1871–1919 гг.). Большим достижением отечественного котлостроения стали котлы выдающегося российского инженера Владимира Григорьевича Шухова (1853–1939 гг.). Водотрубные котлы В.Г. Шухова по многим показателям превосходили зарубежные аналоги и получили широкое распространение.

Дальнейшее совершенствование котельной техники шло в направлении исследования и совершенствования тепловых процессов. Особую важность приобретает изучение процессов теплообмена при кипении жидкости.

В 1939 году вышла в свет известная монография Самсона Семёновича Кутателадзе «Основы теории теплопередачи при изменении агрегатного состояния вещества», сыгравшая значительную роль в дальнейшем исследовании процессов теплообмена при кипении. В монографии приведены обобщения известных данных методами подобия и размерности. В обобщённых уравнениях использован безразмерный комплекс – число фазового перехода $r/(c_p \Delta T)$ (r – удельная теплота фазового перехода; c_p – удельная теплоёмкость жидкой (паровой) фазы; ΔT (или Δt) – перепад температуры в жидкой (паровой) фазе), который впоследствии был назван критерием Кутателадзе.

Важнейший вклад в создание теории теплообмена при кипении внесён Георгием Никитичем Кружилиным (1911–2005). В работе «Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении



ПОЛЗУНОВ Иван Иванович – гениальный русский инженер, изобретатель, ученый, основоположник русской практической теплотехники.

Родился 14 марта 1728 г. в Екатеринбурге в семье солдата государственных строительных работ, выходца из крестьян Туринского уезда Тобольской губернии. В 1738–1742 гг. Ползунов обучался арифметике и словесности в Горнозаводской школе при Екатеринбургском металлургическом заводе, после чего был определён учеником к главному механику уральских заводов Н. Бахареву. У него Ползунов прошёл полный цикл ученических работ: механику, расчёты, чертежи, знакомство с работой заводских машин и металлургическим производством.

В 1747 г. главный командир Колывано-Воскресенских заводов Андреас Беэр, направлявшийся на место своей новой службы в Барнаул, остановился проездом в Екатеринбурге. Здесь, пользуясь предоставленным ему правом, отобрал для царских заводов большую группу горных специалистов, в число которых и вошёл 18-летний Иван Ползунов. К двадцати годам Ползунов уже считался специалистом в горнозаводском деле, пользовался уважением. При Барнаульском медеплавильном заводе получил должность гиттеншрейбера – смотрителя и учётика при плавильных печах. Здесь он изучает особенности процесса плавки металла, вникает в детали процесса, изучает в заводской библиотеке труды М.В. Ломоносова. Начальство завода, видя способности Ползунова, часто помимо основной работы, загружает его различными организационными поручениями. 11 апреля 1750 г., по представлению одного из руководителей Ползунов был произведён в младший шихтмейстерский чин; в 1759 г. получил первый обер-офицерский чин.

Большое влияние на судьбу Ползунова оказал научный труд известного российского химика И.А. Шлаттера «Обстоятельные наставления рудному делу», в котором (помимо передовых разработок в области бурения и очистки руды) он описывает модели английских и венгерских паровых машин.

жидкости в условиях свободной конвекции», опубликованной в 1948 году, им были сформулированы основные положения гидродинамического подхода к описанию процессов кипения, которые получили дальнейшее развитие в работах С.С. Кутателадзе. В 1950 году С.С. Кутателадзе сформулировал гидродинамическую теорию кризисов кипения жидкости. Затем получил формулу для расчета критической тепловой нагрузки. Идея С.С. Кутателадзе о гидродинамической природе кризисов кипения получила дальнейшее развитие в работах большой группы советских ученых – И.И. Маленкова, Б.А. Авксентюка, В.Е. Дорощука, В.М. Боришанского, В.С. Полонского, С.А. Ковалева и многих других. В результате была создана теория кризисов кипения, являющаяся важным достоянием отечественной науки.

В то время как в Европе уже вовсю развивалась идея использования пара, в России, особенно в горнодобывающей области, наиболее целесообразным считалось применение энергии падающей воды. Ползунов, теоретически оценив разницу между водяными и паровыми машинами, пришел к выводу, что следует «водяное руководство пресечь», и уже в апреле 1763 г. предложил проект «огненной машины» – первой действующей паровой машины в России. Изобретение подобного рода не могло остаться неизвестным – о проекте доложили Екатерине II. Просмотрев заявку на изобретение, императрица распорядилась произвести Ползунова в должность «механикуса с чином и званием инженерного капитан-поручика», выдать награду в 400 рублей и обеспечить ему поступление на обучение в Академии наук.

В 1764 г. по разрешению Канцелярии и с финансовой поддержкой, осуществляемой самой императрицей, И. Ползунов приступил к строительству машины, чья мощность превышала заявленную в проекте в 15 раз. Одновременно она должна была обслуживать от 10 до 13 печей – достижение по тем временам исключительное.

Агрегат был собран в рекордно короткие сроки, особенно если принять в расчет величину механизма. Через 13 месяцев после подписания проекта в «машинной хоромине» высотой в 18,5 м был собран паровой механизм. Некоторые его особенно большие детали и узлы весили свыше 2700 кг! По отзывам современников – машина «совсем отличная от английской и венгерской». Важность выполненной работы состояла не только в размерах паровой машины, а в том, что для ее создания потребовалось изобретение ряда сопутствующих механизмов, часть из которых применяется в машиностроении и в настоящее время.

К сожалению, данный агрегат стал последним в жизни Ползунова. Максимальная умственная концентрация и физическое перенапряжение подорвали здоровье изобретателя: он скончался от чахотки в 1766 г., не дожив до запуска своего детища всего неделю.

Проработавшая с августа до ноября с небольшими перерывами машина успела не только окупить затраты на постройку и обслуживание, но и принести колоссальную прибыль. Через несколько лет машина пришла практически в негодность.

Где находится могила гениальнейшего российского инженера, неизвестно.

Популярной и в настоящее время актуальной является модель теплообмена при кипении, предложенная профессором Дмитрием Александровичем Лабунцовым основанная на рассмотрении процесса испарения микроплёнки под паровым пузырьём. Дальнейшее развитие работа получила в трудах учеников его научной школы, впоследствии профессоров МЭИ В.В. Ягова, В.В. Клименко, Е.В. Аметистова, В.А. Григорьева, Ю.В. Козьмы-Китча.

Широко распространенным в технике является и процесс конденсации пара. При этом фазовом превращении наблюдается выделение теплоты, сопровождаемое интенсивным процессом теплообмена. Наглядным примером технического использования процесса является конденсатор паровых турбин. Процесс имеет ряд особенностей и находится под влиянием многочисленных факторов.

Одним из создателей методики теплового расчета паровых турбин и конденсаторов является выдающийся ученый в области теплоэнергетики, один из создателей теории паровых турбин, член-корреспондент Академии наук СССР Александр Александрович Радциг (1869–1941). Работы А.А. Радцига во многом предопределили развитие теории теплообмена при конденсации пара.

Академик Петр Леонидович Капица (1894–1984), анализируя решение Нуссельта о конденсации пара на вертикальной стенке, показал, что расхождение результатов решения и опыта является следствием неучета действия сил поверхностного натяжения, которые значительно усложняют течение пленки конденсата, делают его трехмерным и волнообразным, что приводит в свою очередь к усложнению процесса теплоотдачи.

Важное значение имеют выполненные Г.Н. Кружилиным решения задачи о конденсации пара в трубах и многочисленные опыты по этой проблеме.

Большое влияние на развитие теории теплообмена при конденсации пара и кипении жидкости оказали и зарубежные ученые В. Нуссельт (1882–1957), М.Г.Х. Кнудсен (1871–1949), Киркбрайт, Деклер, Бергелин и другие.

Настоящее учебное пособие подготовлено в связи с переходом на подготовку бакалавров, сокращением числа часов, отведенных на курс «Тепломассообмен» и одновременным увеличением числа часов на самостоятельную работу студентов. Надеемся, что оно будет полезно студентам при самостоятельном изучении фундаментальных изданий по тепломассообмену.

РАДЦИГ Александр Александрович – выдающийся ученый в области теплоэнергетики и прикладной механики, член-корреспондент Академии наук СССР (1935).

Родился 27 января (8 февраля) 1869 г. в с. Елизаветино Калязинского уезда Тверской губернии. В 1891 г. окончил Петербургский технологический институт. С 1900 г. работал профессором Киевского, а с 1909 г. – Петербургского политехнического институтов.

Основные труды Радцига посвящены термодинамике паров, теории теплообмена между паром и стенками цилиндра парового поршневого двигателя, исследованию уравнения состояния водяного пара, разработке теории истечения, развитию теории паровых турбин, новым методам расчета турбин и конденсаторов.

Умер Александр Александрович Радциг 30 декабря 1941 г. в г. Буй Костромской области.



Биографические сведения о выдающихся ученых, внесших значительный вклад в создание теории теплообмена при конденсации пара и кипении жидкости, приведенные в работе, заимствованы из публикаций в различных энциклопедиях и сборниках, а также из общедоступных ресурсов Интернета.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 3 |
| ВВЕДЕНИЕ | 8 |
| I. ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ЧИСТОГО ПАРА | 11 |
| 1. Общие сведения о конденсации пара | 11 |
| 1.1. Понятие о пленочной и капельной конденсации | 11 |
| 1.2. Межфазное термическое сопротивление. Коэффициент конденсации | 12 |
| 1.3. Некоторые особенности гидродинамики пленки конденсата на вертикальной плоской стенке | 14 |
| 2. Теплообмен при пленочной конденсации пара | 22 |
| 2.1. Физические основы процесса | 22 |
| 2.2. Пленочная конденсация неподвижного пара | 24 |
| 2.3. Пленочная конденсация движущегося пара | 31 |
| 3. Теплообмен при капельной конденсации пара | 35 |
| 4. Отдельные задачи теплообмена при конденсации пара | 38 |
| 4.1. Теплообмен при конденсации перегретого пара | 38 |
| 4.2. Теплообмен при конденсации влажного пара | 40 |
| 4.3. Теплоотдача при конденсации пара из парогазовой смеси | 40 |
| II. ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ | 44 |
| 5. Физические особенности процесса кипения | 44 |
| 5.1. Общие сведения | 44 |
| 5.2. Кипение в большом объеме при свободной конвекции | 45 |
| 5.3. Гидромеханическая модель кризиса кипения при вынужденном течении жидкости | 50 |
| 5.4. Кипение при вынужденном течении в трубах | 51 |
| 6. Использование метода подобия для описания теплоотдачи при кипении жидкости | 54 |
| 6.1. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена при кипении жидкости | 54 |
| 6.2. Числа подобия и уравнение подобия теплоотдачи при кипении жидкости | 55 |
| | 93 |

| | |
|--|----|
| 7. Расчет теплоотдачи при кипении жидкости в большом объеме | 58 |
| 7.1. Расчетные формулы теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости | 58 |
| 7.2. Расчет критических тепловых нагрузок | 59 |
| 7.3. Расчетные формулы при пленочном кипении жидкости | 62 |
| 8. Расчет теплоотдачи при кипении жидкости в трубах | 64 |
| 8.1. Расчет критической тепловой нагрузки при кипении жидкости внутри труб | 64 |
| 8.2. Расчетные формулы теплоотдачи при кипении в трубах | 65 |
| ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ. ЗАДАНИЯ К СЕМИНАРАМ..... | 68 |
| Семинар 1. Теплообмен при конденсации чистого пара..... | 68 |
| Семинар 2. Теплообмен при кипении однокомпонентных жидкостей | 78 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ | 87 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 92 |