


Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 11. С. 487–494
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 11, pp. 487–494

Научная статья
УДК 66.021.4

Исследование контактных конденсаторов смесительного типа для паровых турбин

А.А. Емец 

*Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,
Рыбинск, Россия*
 oitf20p@mail.ru

Аннотация. Проведен сравнительный анализ поверхностных и контактных конденсаторов для паротурбинных установок. С учетом особенностей работы паротурбинной установки предложена концепция контактного конденсатора с прямоточной подачей охлаждающей воды в виде распыленных капель в паровой поток. Сформулированы задачи, решение которых необходимо для расчета предложенного контактного конденсатора. Решена задача создания требуемой концентрации капель воды путем распыления блоком из четырех центробежных форсунок. Представлены результаты экспериментов, позволяющие решить задачу расчета требуемой концентрации капель воды в минимальном объеме. Определена форма факела распыления блоком центробежных форсунок. С использованием метода PIV определены скорости капель в факеле распыления (3,1...3,5 м/с), позволяющие рассчитать требуемую высоту факела.

Ключевые слова: поверхностный конденсатор, контактный конденсатор, паротурбинная установка, центробежная форсунка, факел распыла, тепломассообмен

Для цитирования. Емец А.А. Исследование контактных конденсаторов смесительного типа для паровых турбин // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 11. С. 487–494. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177594>

Original article

Studying mixing type contact condensers for steam turbines

А.А. Emets 

Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russia
 oitf20p@mail.ru

Abstract. The authors performed comparative analysis of surface and direct-contact condensers for steam turbines. Considering special features of steam-turbine plant (STP) operation, a concept of direct-contact condenser with straight-flow cooling water feeding in the form of sputtered droplets into steam flow is proposed. The problems, which solution is necessary for the proposed direct-contact condenser computation, are formulated. The authors solved the problem on the required droplets concentration by dispersal with the block of four centrifugal nozzles. The article presents the results of experiments, allowing solving the problem of computing the necessary water droplets concentration in the minimum volume. Geometrical

shape of the spray pattern formed by the swirl atomizers was determined. PIV measuring technique allowed defining droplets velocity distribution in a planar section of the spray pattern (3,1...3,5 m/s) that allow computing its required height.

Keywords: surface condenser, contact condenser, steam-turbine plant, swirl atomizer, spray cone, heat and mass transfer

For citation. Emets A.A. Studying mixing type contact condensers for steam turbines. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 11, pp. 487–494. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177594>

Введение

Важнейшим элементом, обеспечивающим работу современных паровых турбин, является конденсационная установка. Традиционно используются поверхностные конденсаторы, представляющие собой, как правило, кожухотрубные теплообменные аппараты с пучком горизонтальных гладких трубок, внутри которых протекает охлаждающая вода, а на наружной поверхности конденсируется отработавший пар, поступающий из проточной части турбины. В совокупности со вспомогательными устройствами конденсатор обеспечивает полную конденсацию отработавшего пара на режимах пуска и остановки установки, а при нормальных режимах работы энергоблока — сбросного пара и дренажа из других устройств. Расчетным режимом конденсатора является его работа при номинальной мощности паровой турбины, при этом конденсатор должен иметь запас по производительности, который обеспечивает конденсацию свежего пара в случае аварийной остановки турбины при работе парогенерирующей установки на номинальной мощности в течение периода времени выхода парогенератора из действия. Такая ситуация обусловлена свойствами работы как парогенерирующей установки, так и паровой турбины.

К особенностям конденсаторов паровых турбин следует отнести [1, 2]:

- относительно большие скорости парового потока на выходе из турбины и, соответственно, на входе в область конденсации;

- обеспечение минимального парового сопротивления потоку пара на выходе из турбины и, соответственно, на входе в конденсатор, что влияет на работу паровой турбины.

Таким образом, для обеспечения заданных условий поверхностный конденсатор должен иметь достаточно большую поверхность теплообмена, а значит, обладать значительными массогабаритными показателями. Особенно большей

площадью поверхности теплообмена характеризуются конденсаторы паровых турбин атомных электростанций (АЭС) по сравнению с аналогичной поверхностью конденсаторов турбин той же мощности, но установленных на тепловых электростанциях (ТЭС). Например, суммарная площадь поверхности охлаждения конденсатора турбины К-500-6,4/50 ХТЗ составляет 40500 м², а конденсатора турбины К-500-23,5 ХТЗ — 23050 м².

Большие размеры поверхностных конденсаторов паротурбинных установок усложняют их сопряжение с турбиной на ТЭС и АЭС, что является ограничивающим фактором для применения паротурбинных установок (ПТУ) на транспорте. Конструкция поверхностных конденсаторов предопределяет особенности процесса конденсации пара в них. Конденсация пара в закрытом объеме конденсатора приводит к резкому понижению в нем давления, что, в свою очередь, приводит к понижению температуры конденсации остающегося пара и в конечном итоге — к понижению температуры конденсата, его переохлаждению [1], то есть тепловым потерям. В то же время вакуумирование конденсатора приводит к подосу воздуха через неплотности в вакуумной системе турбоагрегата и конденсатора и растворению этого воздуха в конденсате, что требует его деаэрации в дальнейшем. Учет и устранение этих недостатков приводит к усложнению конструкции и к использованию дополнительного оборудования, что увеличивает массогабаритные показатели и приводит к дополнительным затратам энергии.

Таким образом, наличие большой поверхности охлаждения обусловлено расчетом конденсатора при работе парогенерирующей установки на номинальных параметрах. Величину поверхности теплообмена сложно изменить, и она остается постоянной при работе энергоустановки на параметрах ниже номинальных, следовательно, энергоэффективность конденсатора и всей энергоустановки при работе на мощности ниже номинальной сни-

жается. Особенно это актуально для транспортных паротурбинных установок, для которых основные режимы характеризуются пониженными параметрами, при этом регулирование теплосъема в конденсаторе возможно только расходом охлаждающей воды ступенчатым образом. Неэффективная работа конденсационной системы транспортных ПТУ, с одной стороны, приводит к повышенному расходу топлива, а значит, к снижению автономности таких транспортных средств, с другой — к повышенным тепловым выбросам. Также необходимо отметить, что наличие трубных пучков с охлаждающим теплоносителем создает гидравлическое сопротивление прохождению парового потока из выходного патрубка турбины, что негативно сказывается на ее работе.

К недостаткам поверхностных конденсаторов следует отнести загрязнение поверхности теплообмена возможными твердыми отложениями, что приводит к повышению термического сопротивления стенок между охлаждающим теплоносителем и паром и отклонению параметров работы конденсатора от расчетных значений, а значит, к увеличению тепловых потерь.

Наличие охлаждающего трубного аппарата создает вероятность появления свищей в стенках трубной поверхности, неплотностей в трубных досках, что приводит к попаданию охлаждающей воды в конденсат и засаливанию его. Вероятность возникновения неплотности трубной системы конденсатора вырастает, если охлаждающая вода подается в конденсатор под значительным давлением, а при высоком солесодержании охлаждающей воды (морская вода) это может привести к выходу из строя всей ПТУ.

В отличие от поверхностных контактные конденсаторы не имеют большинства из перечисленных недостатков. В настоящее время существует несколько видов контактных конденсаторов, в которых происходит непосредственный контакт пара и охлаждающего теплоносителя [3–5].

Я.М. Брайнес [6] предложил несколько приемов распределения воды в конденсаторах смешения:

- охлаждающая вода орошает поверхность, вдоль которой вместе с водой движется конденсируемый пар;
- охлаждающая вода стекает в виде сплошной завесы, которая с обеих сторон омывается паром. При этом происходит отнятие теплоты от соседних частиц пара и его конденсация;
- охлаждающая вода пропускается через отверстия в тарелках конденсатора таким образом, что

отдельные водяные струйки пронизывают массу конденсируемого пара. Такой прием дает большую поверхность соприкосновения пара и воды;

- охлаждающая вода подается в конденсатор в виде капель (распыливание).

Задачей конденсационной системы ПТУ является максимально быстрое удаление отработавшего пара от выхода проточной части паровой турбины с минимальным гидравлическим сопротивлением. Любое повышение давления отработавшего пара за последней ступенью турбины приводит к снижению эффективности ее работы и повышению влажности пара, а также к повышению эрозийного износа лопаток.

Таким образом, наиболее эффективным в качестве конденсатора ПТУ является контактный теплообменник с прямоточной подачей охлаждающей воды в виде распыленных капель в паровой поток. Факел распыла создает дополнительный эжекционный эффект для пара, обеспечивая эффективное его удаление от последней ступени турбины. Установка форсунок возможна прямо в корпусе турбины за последней ступенью, что делает конденсатор практически встроенным в корпус турбины, резко снижая массогабаритные показатели всего энергоблока. Большая поверхность теплообмена обусловлена суммарной площадью поверхности капель, а высокая скорость тепло- и массообмена обеспечивает достаточную эффективность конденсации. Изменение количества и температуры подаваемой распыленной воды, дисперсности распыленных капель дает возможность гибкого регулирования параметров работы конденсатора как по площади теплообмена, так и по термическому перепаду между теплоносителями. Такая гибкость изменения параметров обеспечивает возможность быстрой настройки работы конденсатора на любых режимах работы ПТУ, что повышает эффективность работы всей энергоустановки и снижает теплотери в окружающую среду.

Принципиальная схема ПТУ с контактным конденсатором имеет вид, представленный на рис. 1.

Требования к методике расчета контактного конденсатора

Для создания методики расчета контактного конденсатора ПТУ необходимо рассмотреть процесс конденсации потока пара на движущихся каплях распыленной жидкости. Для этого необходимо решение следующих задач:

- для заданной температуры охлаждающей воды рассчитать требуемое количество капель и их

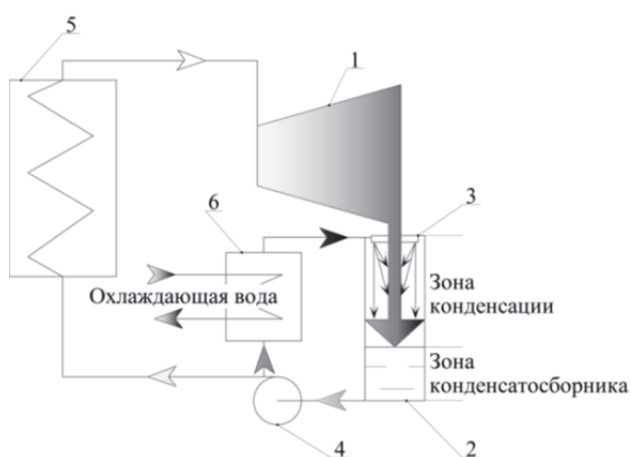


Рис. 1. Принципиальная схема ПТУ с контактным конденсатором: 1 — паровая турбина, 2 — контактный конденсатор, 3 — блок форсунок, 4 — конденсатный насос, 5 — парогенератор, 6 — охладитель конденсата.

диаметр для обеспечения полной конденсации заданного расхода пара;

- определить необходимый минимальный объем факела распыления, содержащий требуемое количество капель воды.

Для решения поставленных задач необходимо рассмотреть процесс распыления воды в конденсаторе и последующее движение капельного потока. В качестве распылителей наиболее эффективны центробежные форсунки [7]. Струя жидкости, распыляемая центробежной форсункой, распадается на большое число капель, размеры которых существенно меньше выходного диаметра сопла [8]. Для расчета оптимальных конструктивных размеров центробежной форсунки необходимо найти определенные значения основных параметров, к которым относятся:

- массовый расход воды через форсунку;
- величина корневого угла факела распыла;
- толщина пелены воды в выходном сечении сопла форсунки и в факеле распыла в непосредственной близости от среза сопла форсунки;
- скорость воды внутри форсунки и в пелене факела распыла.

Точное определение данных параметров на этапе проектного расчета позволяет провести выбор конструкции форсунок с наименьшими экономическими затратами.

Экспериментальный стенд и его характеристики

При повышении качества распыливания происходит интенсификация процессов тепло- и мас-

сообмена, что повышает эффективность конденсатора, при этом несколько снижается расход распыляемой воды. Для обеспечения необходимой концентрации капель заданного диаметра требуется совместная работа нескольких форсунок, объединенных в блок. Совместная работа блока форсунок обеспечивает требуемую кратность охлаждения с заданной степенью дисперсности. При рассмотрении работы блока форсунок необходимо рассчитывать параметры получаемого суммарного факела распыления. Очевидно, что геометрические размеры контактного конденсатора определяются именно формой и размерами факела распыления, который в свою очередь зависит от характеристик распыления и направленности факелов распыления от каждой форсунки. При организации общего факела во внутреннем объеме конденсатора необходимо учитывать минимизацию попадания распыленных капель воды на твердые поверхности (стенки) до момента завершения процессов тепло- и массообмена. Попадающие на твердые поверхности распыленные капли образуют пленку воды, стекающую по стенкам конденсатора. Интенсивность процессов тепломассообмена между пленкой воды и паром значительно ниже, чем между паром и каплями.

Для определения характеристик распыления блоком центробежных форсунок разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 2. Главной целью настоящего исследования являлось определение характеристик распыления воды блоком центробежных форсунок и параметров образующегося суммарного факела.

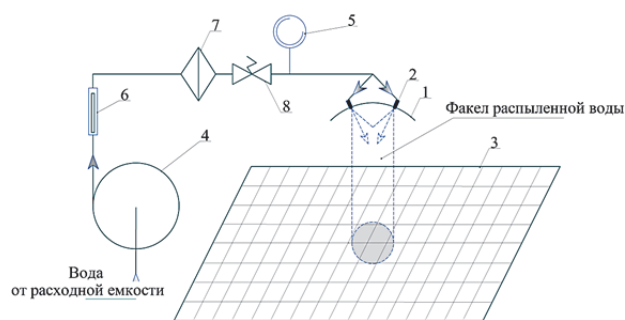


Рис. 2. Установка по определению характеристик распыления блоком форсунок: 1 — блок форсунок, 2 — центробежная форсунка, 3 — мерная поверхность, 4 — центробежный насос, 5 — манометр, 6 — ротаметр, 7 — фильтр тонкой очистки, 8 — редуктор

Распыление воды осуществлялось блоком (1) центробежных форсунок (2) с диаметром сопла 0,6 мм. Для определения плотности распыления

и конфигурации создаваемого совместного факела использовалась мерная плоскость (3) с расположенными на ней мерными пробирками. Подачу воды обеспечивал центробежный насос (4). Давление воды на форсунках контролировалось манометром (5), расход — ротаметром (6). Фильтр тонкой очистки (7) обеспечивал чистоту подаваемой воды, редуктор (8) поддерживал величину требуемого давления. Проводились экспериментальные исследования блока, состоящего из четырех центробежных форсунок, расположенных по окружности под углом 140 к оси блока (рис. 2).

Характеристики факела распыла определялись на основе оптических бесконтактных измерений и визуализации. Для этого создавалась вертикальная лазерная плоскость, проходящая через исследуемое сечение двухфазного потока. Сама плоскость создавалась импульсным Nd:YAG лазером с длиной волны 532 нм и максимальной энергией 200 мДж на одну вспышку длительностью до 10 нс. Монохромное изображение разрешением 4 Мп обрабатывалось в графическом редакторе для получения величины корневого угла распыла.

Для определения скорости двухфазного потока использовался метод PIV (Particle Image Velocimetry). В качестве трассеров использовались непосредственно капли воды, распыляемые форсункой. Обработка исходных изображений осуществлялась на основе кросскорреляционного итерационного алгоритма, реализованного в программном комплексе Actual Flow. Осреднение распределений скорости проводилось для выборки из не менее чем 200 мгновенных реализаций факела распыла.

Результаты исследований

Экспериментальные исследования показали, что создаваемые форсунками факелы распыления воды создают единую зону, заполненную каплями распыленной воды. Зона распыления состоит из пяти участков: а) четыре начальных участка в виде конусов непосредственно факелов распыления форсунок и б) общая зона распыления в виде цилиндра, получаемая при слиянии факелов распыления от каждой форсунки.

На рис. 3 представлена фотография факела распыления, выполненная при контрольном освещении. В фокусе объектива находятся две форсунки из четырех. Симметричное расположение форсунок позволяет распространить данные, полученные из изображения на форсунки, не попавшие в фокус объектива фотоаппарата.

На фотографии видно, что при перепаде давления 0,3 МПа корневой угол для каждого факела распыла составляет 28° . Также можно наблюдать, что отдельные факелы распыления сливаются в единый поток, который имеет форму цилиндра с диаметром приблизительно 300 мм. Указанная область является ключевой с точки зрения организации в ней контактного теплообмена между потоками капель воды и пара.

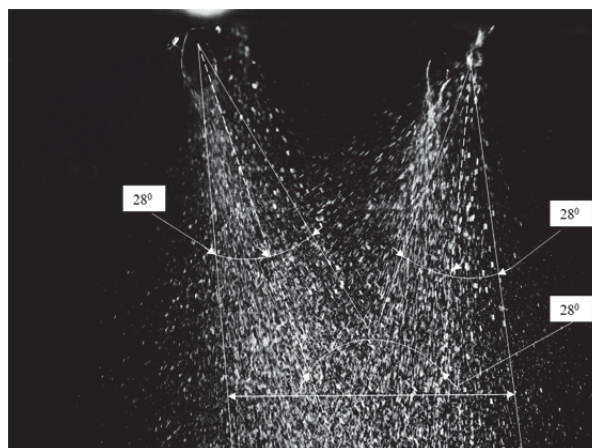


Рис. 3. Фотография факела распыления, создаваемого блоком форсунок

Результаты экспериментов по исследованию плотности орошения представлены на рис. 4.

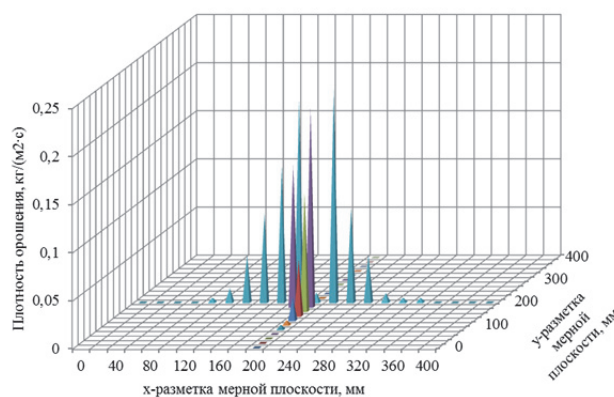


Рис. 4. Плотность орошения факела распыления блоком форсунок при перепаде давления 0,3 МПа

Для решения задачи по определению минимального объема факела распыления, содержащего требуемое количество капель воды, необходимо определить скорость капель в факеле, создаваемом блоком форсунок. Для этого использован метод PIV, результаты эксперимента представлены на рис. 5.

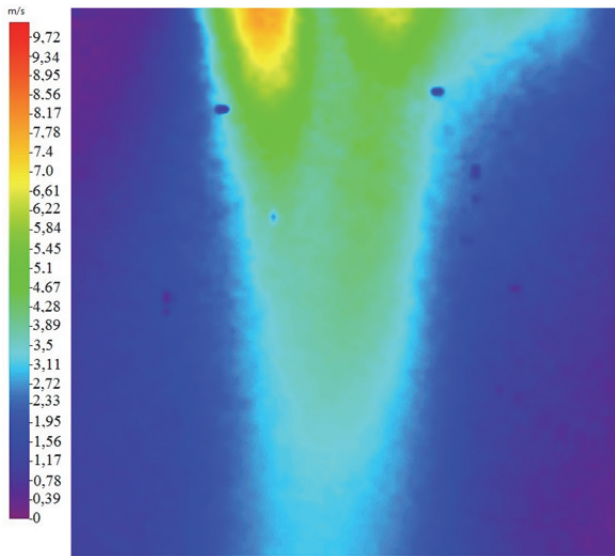


Рис. 5. Распределение скорости капель в факеле распыла при перепаде давления 0,3 МПа

На рис. 5 видно, что максимальная скорость потока составляет 9 м/с на выходе воды из сопла форсунок (верх рисунка). На данной скорости происходит распад пленки на капли, диаметр которых определяется величиной этой скорости. Далее происходит относительная стабилизация движения потока капель. Получаемые при распылении каждой форсункой капли создают единый поток с максимальной скоростью в центре факела, лежащей в диапазоне 3,1...3,5 м/с (рис. 5). Известная величина скорости пленки воды, создаваемой форсункой, и капель в двухфазном потоке дает возможность рассчитать число Вебера, которое определяет устойчивость капель к разрушению [10]. Число Вебера определяется по диаметру и скорости капли:

$$We = \frac{\rho_g \cdot v_k^2 \cdot d_k}{\sigma_{ж}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{ж}$ — поверхностное натяжение жидкости (капли), Н/м; ρ_g — плотность газовой фазы, кг/м³; v_k — скорость капли, м/с; d_k — диаметр капли, м.

В работах [9, 10] показано, что при $We = 10,7$ происходит раздвоение капли, а при $We \geq 14,6$ ее дробление на «рой» более мелких капель. Таким образом, величина критической скорости движения капли в неподвижном воздухе, при которой начинается ее распад, равна:

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{10,7 \cdot \sigma_{ж}}{\rho_g \cdot d_k}}. \quad (2)$$

Выражение (2) возможно использовать на начальном этапе — распаде выходящей из центробежной форсунки пленки воды для определения диаметра образующихся капель. Как показали эксперименты (рис. 5), после распада потока воды на капли происходит резкое снижение скорости капель до определенной величины, в исследованном случае до 3,1...3,5 м/с, после чего снижение скорости протекает более равномерно. Зная скорость капель в потоке и принимая, что поток капель имеет форму цилиндра, возможно рассчитать требуемую высоту факела, то есть расстояние от точки образования до поверхности конденсата, образующегося в нижней части конденсатора. Исходя из высоты факела и возможного объема конденсата в его нижней части выполняется расчет требуемых размеров конденсатора.

Нерешенной остается задача по определению необходимого количества и концентрации капель для обеспечения конденсации пара. Для ее решения требуется определение относительной скорости капель в потоке распыления. Представленная на рис. 5 абсолютная скорость капель имеет наибольшие значения в ядре потока в результате того, что газовая среда, увлекаемая каплями, движется вместе с потоком капель. Следовательно, относительная скорость капель по отношению к газовой среде в центре потока ниже, чем на его границах. Для определения требуемого количества капель для расчета процесса тепломассообмена необходима именно относительная скорость капель.

Следует отметить, что представленные эксперименты проводились в неподвижной газовой среде. В проектируемый контактный конденсатор пар подается прямоточно по отношению к потоку распыленных капель, следовательно, произойдет еще большее снижение относительной скорости капель.

Проведенные экспериментальные исследования подчеркивают сложность проектирования контактных теплообменных аппаратов конденсационного типа. Полученные результаты показывают, что существующие математические модели контактной конденсации, разработанные С.С. Кутателадзе, В.П. Исаченко, В.П. Михайловым, Ю.С. Потаповым, А.С. Латкиным, А.Р. Лянцберггом, В.А. Барилловичем и многими другими авторами [10–14], не в полной мере могут быть использованы для создания методики расчета соответствующих устройств. Таким образом, необходимы дополнительные экспериментальные

исследования для определения закономерностей протекающих тепломассообменных процессов и создания методики расчета конденсатора паротурбинной установки.

Заключение

В работе проведен сравнительный анализ поверхностных и контактных конденсаторов для паровых турбин. Теоретически показано, что для транспортных энергетических установок, особенно ядерных, наиболее эффективным является контактный конденсатор, так как он обеспечивает более энергоэффективную работу паровой турбины и позволяет снизить тепловые выбросы в окружающую среду. Предложена концепция парового контактного конденсатора для ПТУ и сформулированы задачи, решение которых позволит рассчитывать конструкцию предложенного парового конденсатора. Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют частично решить поставленные задачи. Для полного решения задач необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

Список источников

1. **Бродов Ю.М., Савельев Р.З.** Конденсационные установки паровых турбин. Москва: Энергоатомиздат, 1994. 288 с.
2. **Берман С.С.** Теплообменные аппараты и конденсационные устройства турбоустановок. Москва: МАШГИЗ, 1959. 484 с.
3. **Касаткин А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии. Москва: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1961. 832 с.
4. **Москалев Л.Н., Поникаров С.И., Поникаров И.И., Алексеев В.В.** Сравнение контактно-вихревого конденсатора с закрученным потоком с поверхностными вихревыми и кожухотрубными конденсаторами // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 3. С. 123–126.
5. **Москалев Л.Н.** Тепломассообменный процесс при контактной конденсации: дис. ... канд. техн. наук. Казань: Издательство КНИТУ, 2016. 174 с.
6. **Брайнес Я.М.** Процессы и аппараты химических производств. Москва: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1947. 597 с.
7. **Пажи Д.Г., Галустов В.С.** Основы техники распыливания жидкостей. Москва: Химия, 1984. 107 с.
8. **Галустов В.С.** Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 240 с.
9. **Клинский Б.М., Кудрявцев А.В.** Обоснование требований по величине весовой концентрации и дисперсности капель воды при проектировании стендовой установки для имитации попадания дождя // Наука. 2012. № 3(81). С. 10–12.
10. **Кутателадзе С.С., Стырикович М.А.** Гидродинамика газожидкостных систем. Москва: Энергия, 1976. 296 с.
11. **Исаченко В.П., Солодов А.П., Самойлович Ю.З.** Экспериментальное исследование теплообмена при конденсации водяного пара на турбулентных струях воды // Труды IV Всесоюзного совещания по тепло- и массообмену. Минск. 1972. 442 с.
12. **Исаченко В.П., Сотсков С.А., Якушева Е.В.** Исследование теплообмена при конденсации водяного пара на турбулентных струях воды // Труды МЭИ. 1975. Вып. 235. С. 145–152.
13. **Исаченко В.П.** Теплообмен при конденсации. Москва: Энергия, 1977. 240 с.
14. **Барилевич В.А.** Основы термогазодинамики двухфазных потоков и их численное решение: учебное пособие. Санкт-Петербург: Издательство политехнического университета, 2009. 425 с.

References

1. **Brodov Yu.M., Savelyev R.Z.** Kondensatsionnye ustanovki parovykh turbin [Condensation units for steam turbines]. Moscow: Energoatomizdat, 1994, 288 p.
2. **Berman S.S.** Teploobmennye apparaty i kondensatsionnye ustroystva turboustanovok [Heat exchangers and condensation devices of turbine plants]. Moscow: Mashgiz, 1959, 484 p.
3. **Kasatkin A.G.** Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii [Basic processes and devices of chemical technology]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo khimicheskoi literatury, 1961, 832 p.
4. **Moskalev L.N., Ponikarov S.I., Ponikarov I.I., Alekseev V.V.** Sravnenie kontaktno-vikhrevogo kondensatora s zakruchennym potokom s poverkhnostnymi vikhrevymi i kozhukhotrubnymi kondensatorami [Comparison of contact-vortex condenser with swirling flow with surface vortex and shell-and-tube condensers]. *Herald of technological university*, 2012, vol. 15, no. 3, pp. 123–126.
5. **Moskalev L.N.** Teplomassoobmennyi protsess pri kontaktnoi kondensatsii [Heat and mass transfer processes at direct-contact condensation]. Ph. D. thesis. Kazan: Publishing Kazan National Research Technological University, 2016, 174 p.
6. **Braynes Ya.M.** Protsessy i apparaty khimicheskikh proizvodstv [Processes and devices of chemical industry]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo khimicheskoi literatury, 1947, 597 p.
7. **Pazhi D.G., Galustov V.S.** Osnovy tekhniki raspylivaniya zhidkosti [Foundations of liquids atomization technique]. Moscow: Khimiya, 1984, 107 p.

8. **Galustov V.S.** Pryamotochnye raspylitel'nye apparaty v teploehnergetike [Direct-flow atomizing devices for thermal engineering]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 240 p.
9. **Klinskiy B.M., Kudryavtsev A.V.** Obosnovanie trebovaniy po velichine vesovoi kontsentratsii i dispersnosti kapel' vody pri proektirovaniy stendovoi ustanovki dlya imitatsii popadaniya dozhdya [Substantiation of the requirements for the magnitude of the weight concentration and dispersion of water droplets when designing a bench installation to simulate rain]. *Nauka*, 2012, no. 3(81), pp. 10–12.
10. **Kutateladze S.S., Styrikovich M.A.** Hydrodynamics of gas-liquid systems. Moscow: Energiya, 1976, 296 p.
11. **Isachenko V.P., Solodov A.P., Samoylovich Yu.Z.** Eksperimental'noe issledovanie teploobmena pri kondensatsii vodyanogo para na turbulentnykh struyakh vody [Experimental study of heat transfer in steam condensation at turbulent water jets]. *Trudy IV Vsesoyuznogo soveshchaniya po teplo- i massoobmenu*. Minsk, 1972, 442 p.
12. **Isachenko V.P., Sotskov S.A., Yakusheva E.V.** Issledovanie teploobmena pri kondensatsii vodyanogo para na turbulentnykh struyakh vody [Investigation of heat transfer in steam condensation at turbulent water jets]. *Trudy Moskovskogo ehnergeticheskogo instituta*, 1975, iss. 235, pp. 145–152.
13. **Isacheko V.P.** Heat transfer during condensation. Moscow: Energiya, 1977, 240 p.
14. **Barilovich V.A.** Osnovy termogazodinamiki dvukhfaznykh potokov i ikh chislennoe reshenie: uchebnoe posobie [Foundations of thermal and gas dynamics of two-phase flows and its numerical solution: Learning guide]. Saint Petersburg: Izdatel'stvo politekhnicheskogo universiteta, 2009, 425 p.

Статья поступила в редакцию 07.07.2023; одобрена после рецензирования 07.10.2023; принята к публикации 18.11.2023.

The article was submitted on 07.07.2023; approved after reviewing on 07.10.2023; accepted for publication on 18.11.2023.