

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-2-115-123>

УДК 621.165

Разработка дроссельно-увлажнительного устройства для атомной энергетической установки ледокола ЛК-60

Сухорукова Е. А., Колпаков С. П.*

Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова (ОАО «НПО ЦКТИ») Атаманская ул., д. 3/6, 191167, Санкт-Петербург, Россия

Поступила / Received 08.06.2021

Принята к печати / Accepted for publication 22.06.2021

При разработке конструкций смешивающих теплообменных аппаратов, особое внимание уделяется обеспечению надежности внутрикорпусных устройств, подверженных эрозионному износу при попадании капельной влаги и температурным напряжениям.

ОАО «НПО ЦКТИ», имея многолетний опыт в области разработки теплообменных аппаратов контактного типа, принимало непосредственное участие в проектировании отдельного оборудования энергетической установки для ледокола ЛК-60, в том числе дроссельно-увлажнительного устройства (ДУУ).

Приводится описание функционального назначения ДУУ в составе атомной энергетической установки ЛК-60, принцип работы и существенные отличия новой конструкции от ранее применявшихся. Отмечено, что если в предыдущих проектах ДУУ включало четыре колонки, соединенные попарно, то на ЛК-60 предусмотрено две колонки, расположенные сверху конденсатора. ДУУ для ЛК-60 рассчитан на прием 132,5 т/ч пара более высоких параметров, чем конструкции предыдущего поколения, рассчитанные на прием около 50 т/ч пара.

Приведены основные технические решения при разработке конструкции ДУУ. Конструктивно предусмотрен доступ к дросселирующим решеткам для диагностики и их замены в случае необходимости, что обеспечивает высокую степень ремонтпригодности и надежности устройства. Перфорация решеток, расположенных последовательно по ходу движения потока пара, выполнена таким образом, чтобы отверстия предыдущей решетки по возможности не располагались напротив отверстий последующей решетки. Расстояние между дросселирующими решетками принималось из условий обеспечения расчетного протекания процесса дросселирования пара.

Приведены результаты теплового и гидравлического расчетов ДУУ. Расчет состоит из двух основных частей. Первая часть включает тепловой и гидравлический расчеты с определением степени перфорации решеток, распределения температуры и давления пара по сечениям ДУУ и т. д. Вторая часть содержит расчет форсунок для впрыска охлаждающего конденсата.

В процессе конструкторских проработок для всех вариантов ДУУ и отдельных деталей выполнены расчеты на прочность. Кроме того, форсунки прошли полный цикл испытаний (определение расходных характеристик, качества распыла воды) в соответствии с программой испытаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: смешивающий теплообменник, дроссельно-увлажнительное устройство, надежность, разработка конструкции, тепло-гидравлический расчет

Адрес для переписки:

Колпаков С. П.

ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»)

ул. Атаманская, 3/6, 191167, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: KolpakovSP@ckti.ru

Address for correspondence:

Kolpakov S. P.

Joint Stock Company "I. I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment" (JSC "NPO CKTI")

3/6, Atamanskaya Str., Saint-Petersburg, Russia, 191167
e-mail: KolpakovSP@ckti.ru

Для цитирования:

Сухорукова Е. А., Колпаков С. П. Разработка дроссельно-увлажнительного устройства для атомной энергетической установки ледокола ЛК-60. Надежность и безопасность энергетики. 2021. – Т.14 №2 с. – Т. 14, №2 – С. 115–123.

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-2-115-123>

For citation:

Sukhorukova E. A., Kolpakov S. P. [Development of a throttle and dampening device for the nuclear power plant of the icebreaker LK-60]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2021. vol. 14, no. 2, pp. 115–123 (in Russian).

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-2-115-123>

Development of a throttle and dampening device for the nuclear power plant of icebreaker LK-60

Sukhorukova E. A., Kolpakov S. P.*

Joint Stock Company "I. I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment" (JSC "NPO CKTI")

3/6, Atamanskaya Str., Saint-Petersburg, Russia, 191167

In the course of developing designs for mixing heat exchangers that operate on the principle of throttling the working medium on perforated grids, special attention is paid to ensuring the reliability of structures subject to erosive wear when subjected to dripping moisture and temperature stresses.

JSC "NPO CKTI" has years of experience in the development of contact-type heat exchangers and was directly involved in the design of separate power plant equipment for LK-60, including a throttle and dampening device (TDD).

It provides a description of the functional purpose of the TDD as part of the LK-60 nuclear power plant, the principle of operation and significant differences of the new design from those previously used. It is noted that while in previous designs the TDD included four columns connected in pairs, on LK-60 there are two columns located on top of the condenser. The TDD for LK-60 is designed to receive 132.5 t / h of steam of higher parameters than the previous generation designs intended to receive about 50 t / h of steam.

The main technical solutions in the development of the design of the TDD are presented. The design provides access to the throttling lattices for diagnostics and their replacement if necessary which ensures a high degree of maintainability and reliability of the device. Perforation of the lattices arranged in series in the direction of the steam flow is made in such a way that the openings of the previous lattice, if possible, are not located opposite the openings of the subsequent lattice. The distance between the throttling lattices was taken from the conditions for ensuring the design course of the steam throttling process.

Results are given of thermal and hydraulic calculations of the TDD. The calculation consists of two main parts. The first part includes thermal and hydraulic calculations with the determination of the degree of perforation of the lattices, the distribution of temperature and vapor pressure over the cross-sections of the TDD, etc. The second part contains the calculation of the cooling condensate injection nozzles.

In the course of design studies, strength calculations were performed for all versions of TDD and individual parts. In addition, the nozzles underwent a full test cycle (determination of flow characteristics, water spray quality) in accordance with the test program.

KEYWORDS: mixing heat exchanger, throttle and dampening device, reliability, design development, heat-hydraulic calculation

Для России освоение Арктики является приоритетным направлением как с точки зрения экономики, так и стратегической обороноспособности. Основой динамичного освоения данного региона стало строительство атомного ледокольного флота. На сегодняшний день в эксплуатации находятся два ледокола проекта 10520 (типа «Арктика») и один проекта 10580 (типа «Таймыр»). Выведение из эксплуатации в начале 2000-х годов большинства атомных ледоколов в связи с истечением установленного (и продленного) ресурса инициировало разработку нового атомного ледокола ЛК-60 проекта 22220. В октябре 2020 г. головной ледокол ЛК-60 «Арктика» принят в эксплуатацию.

ОАО «НПО ЦКТИ» принимало непосредственное участие в проектировании отдельного оборудования энергетической установки для ЛК-60, в том числе дроссельно-увлажнительного устройства (ДУУ).

Особенностью конструкции судовых атомных энергетических установок (АЭУ) в отличие от стационарных является необходимость обеспечения маневренных характеристик во всем диапазоне возможных нагрузок, то есть переход с одного режима на другой в ограниченный период времени. Для этого в тепловую схему

судовой АЭУ включено ДУУ.

ДУУ предназначено для приема свежего пара и подготовки его к конденсации в конденсаторе при изменении мощности турбины. При этом свежий пар сбрасывается в ДУУ через клапан травления, минуя турбину. При прохождении пара через ДУУ его давление и температура снижаются. Снижение давления осуществляется на дроссельных решетках. При этом в режиме максимальной нагрузки перепад давления на каждой из решеток близок или равен критическому. Снижение температуры достигается впрыском в поток пара холодного конденсата и его последующим испарением, то есть, ДУУ представляет собой теплообменный аппарат контактного или смешивающего типа. Обеспечение надежности смешивающих теплообменных аппаратов остается актуальным на сегодняшний день для тепловых и атомных электростанций (ТЭС, АЭС), а также и судовых энергетических установок [1–5].

Существенной особенностью конструкции ДУУ для АЭУ ледокола ЛК-60 является его расположение относительно других элементов энергетической установки и габаритные ограничения при условии заметного увеличения мощности по сравнению с предыдущими

проектами. Если в проекте 10520 ДУУ включало четыре колонки, соединенные попарно с переходными патрубками в нижней части корпуса конденсатора, то на ЛК-60 предусмотрено две колонки, расположенные сверху конденсатора. Колонки ДУУ предыдущих поколений были рассчитаны на прием около 50 т/ч пара, который охлаждался конденсатом и дросселировался на семи дроссельных решетках до давления, близкого к давлению в конденсаторе. ДУУ для ЛК-60 рассчитан на прием 132,5 т/ч пара более высоких параметров (см. таблицу 1), при этом высота ДУУ ограничена близким расположением других элементов турбинной установки, а входной фланец в конденсатор имеет фиксированное сечение. Указанные обстоятельства оказали существенное влияние на конструкторские решения при разработке ДУУ для ЛК-60.

1. Разработка конструкции ДУУ

Сечение входного фланца конденсатора для приема пара за ДУУ определило конструкцию корпуса устройства как усеченную пирамиду с прямоугольным основанием. Высота корпуса (или пирамиды) ограничена расположением сбросного клапана ДУУ на трубопроводе свежего пара.

Предварительный расчет показал, что заданный объем пара 132,5 т/ч при номинальных параметрах возможно охладить и сдросселировать до давления 0,05 кг/см² на не менее чем девяти дроссельных решетках.

Общий вид ДУУ представлен на рисунке 1.

ДУУ представляет собой вертикальную колонку, состоящую из трех секций, соединенных фланцевыми разъемами. Наличие фланцевых соединений позволяет обеспечить доступ к дросселирующим решеткам для диагностики и их замены в случае необходимости. Все фланцевые разъемы, объединяющие секции корпуса, предусматривают применение шпилек М30.

Под клапаном травления в нижнем фланце Ду250 предусмотрен выступ для установки первой по ходу пара дросселирующей решетки №1, представляющей собой круглый плоский лист толщиной 5 мм, диаметр отверстий перфорации равен 4 мм. Зазор между фланцами соединения обеспечивает возможность обварки дросселирующей решетки. Пройдя первую дросселирующую решетку, пар поступает в коническую часть корпуса.

Конические дросселирующие решетки №2, 3, 4 объединены в пакет при помощи шпилек М8 и устанавливаются на нижний фланец соединения средней и верхней секций корпуса ДУУ. Зона перфорации решетки №4 выполнена отверстиями диаметром 4 мм. Конструкция зоны перфорации решеток №2 и 3 предусматривает необходимость применения двух калибров отверстий. Верхняя часть решеток перфорирована отверстиями 4 мм, нижняя — отверстиями 3 мм.

В средней секции корпуса установлены три дросселирующие решетки. Решетки №5, 6 и 7 выполнены в виде усеченных пирамид. Пакет из трех указанных решеток устанавливается на выступе фланца соединения средней и нижней секции корпуса и закрепляется шпильками М8. Верхняя часть зоны перфорации

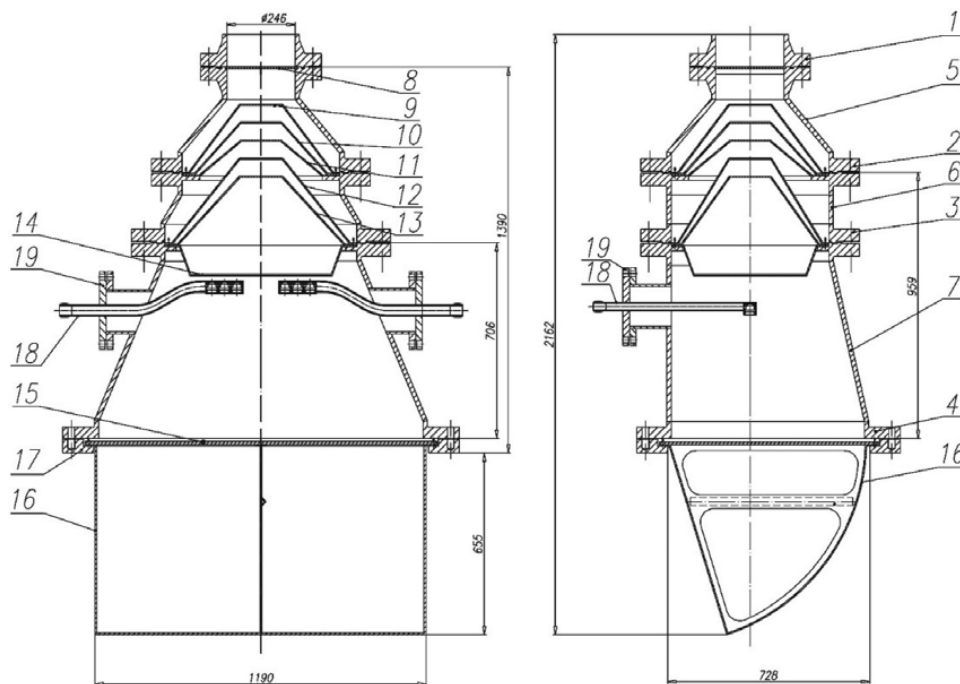


Рисунок 1. Общий вид ДУУ ЛК-60. Цифрами обозначены: 1–4 — фланцевые соединения; 5 — верхняя секция; 6 — средняя секция; 7 — нижняя секция; 8–16 — дросселирующие решетки №№1–9 соответственно; 17 — фланец конденсатора; 18 — трубопроводы для подключения форсунок; 19 — крышка лючка для осмотра

Figure 1. General view of TDD LK-60. The numbers indicate: 1–4 — flange connections; 5 — top section; 6 — middle section; 7 — lower section; 8–16 — throttling grids No. 1–9, respectively; 17 — condenser flange; 18 — pipelines for connecting injectors; 19 — inspection hatch cover

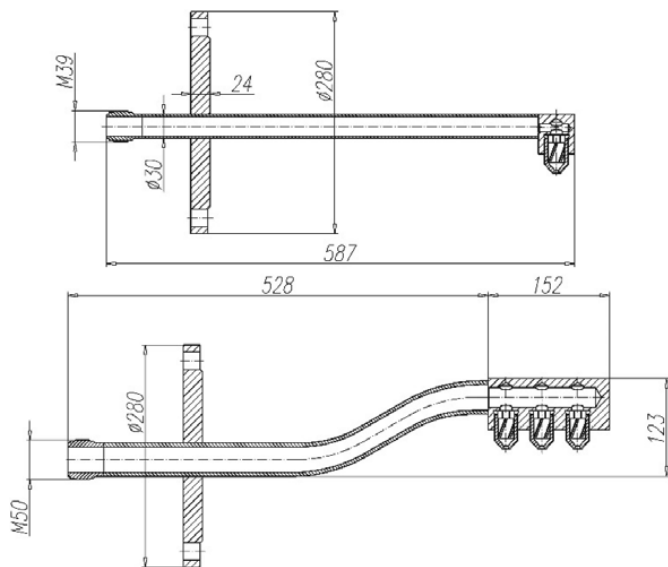


Рисунок 2. Форсунки. Верхняя форсунка не регулируемая, нижняя группа форсунок — регулируемая (на ДУУ установлено две группы)

Figure 2. Nozzles. The upper nozzle is not adjustable, the lower group of nozzles is adjustable (two groups are installed on TDD)

решетки №5 выполнена отверстиями диаметром 4 мм, нижняя — диаметром 3 мм. Вся зона перфорации решетки №6 выполнена отверстиями 5 мм.

Перфорация решеток, расположенных последовательно по ходу движения потока пара, выполнена таким образом, чтобы отверстия предыдущей решетки по возможности не располагались напротив отверстий последующей решетки.

Расстояние между дросселирующими решетками принималось из условий обеспечения расчетного протекания процесса дросселирования пара.

В нижней секции корпуса (зона испарительного участка) предусмотрена установка трех групп форсунок, предназначенных для охлаждения пара впрыском конденсата. На обечайке корпуса ДУУ расположены три патрубка с фланцевыми разъемами. К крышкам фланцевых соединений привариваются трубы подвода конденсата, впрыскиваемого через форсунки. Сами трубы заводятся внутрь корпуса ДУУ, на концах этих труб устанавливаются форсунки (рисунок 2).

Конструктивно все форсунки одинаковые и по принципу распыла относятся к форсункам струйно-центробежного (смешанного) типа. Первая и вторая группы форсунок представляют собой моноблочные конструкции с тремя форсунками каждая. Установлена также одна нерегулируемая форсунка. Форсунки отличаются только геометрическими характеристиками проточных частей.

Собственно, форсунка представляет собой конический корпус с осевым отверстием в вершине, присоединяемый к ответной части на концах труб подвода резьбой в основании конуса. Для обеспечения закрутки потока на выходе из форсунки и достижения требуемой дисперсности распыла в корпусе форсунки установлен цилиндрический вкладыш со сквозным осевым

отверстием и винтовыми каналами квадратного сечения на поверхности.

Находящиеся внутри корпуса конденсатора дросселирующие решетки №8 и 9 крепятся шпильками М8 к фланцу конденсатора. Дросселирующая решетка №9 состоит из двух перфорированных листов и двух сплошных листов, сконфигурированных таким образом, чтобы исключить прямой поток расширившегося пара на ближние стенки конденсатора. К середине гнутого листа решетки №9 приваривается ребро с целью обеспечения жесткости листа.

Решетка №8 в отличие от всех остальных решеток ДУУ выполнена из листа толщиной 12 мм с целью уменьшения эрозионного износа поверхности решетки, в связи с ее установкой непосредственно за испарительным участком ДУУ. Зона перфорации этой решетки разделена перемычкой, служащей дополнительным ребром жесткости.

2. Результаты теплового и гидравлического расчетов ДУУ

Расчет ДУУ состоит из двух основных частей. Первая часть включает тепловой и гидравлический расчеты с определением степени перфорации решеток, распределения температуры и давления пара по сечениям ДУУ и т. д. Вторая часть содержит расчет форсунок для впрыска охлаждающего конденсата.

Исходные данные для выполнения теплового и гидравлического расчетов ДУУ приведены в таблице 1.

С целью увеличения длины испарительного участка в ДУУ первая решетка была совмещена со входным фланцем. Дроссельные решетки №2, 3 и 4 были выполнены в виде усеченных конусов, а №5, 6 и 7 в виде усеченных пирамид. Благодаря этому длину испарительного участка (впрыск конденсата в поток пара осуществляется форсунками в пространство между седьмой и восьмой решетками.) удалось увеличить до 500 мм. Для обеспечения расчетного протекания процесса дросселирования пара минимальное расстояние между решетками, принятое в конструкции ДУУ, составляло не менее 6 диаметров отверстия в решетке.

Такое расстояние соответствует почти 4-х кратному увеличению площади струи пара по сравнению с площадью отверстия и, соответственно, примерно шестнадцатикратному снижению динамического напора в струе пара по сравнению с динамическим напором в отверстиях решетки. Для выполнения выше указанного условия в периферийных зонах решеток № 3 и 5 диаметр отверстий уменьшался с четырех до трех миллиметров. Дополнительным условием при конструктивном исполнении перфорации являлось обеспечение

Таблица 1. Исходные данные для теплового и гидравлического расчетов ДУУ
Table 1. Initial data for thermal and hydraulic calculations of TDD.

Наименование параметра Parameter name	Размерность Dimension	Величина The quantity
Количество колонок ДУУ в главном конденсаторе Number of TDD columns in the main condenser	шт. (pc)	2
Расход пара на одну колонку ДУУ в режимах: Steam consumption per one TDD column in modes: – максимальной нагрузки /maximum load	т/ч (t/h)	132,5
– мощность ТГ 20% / TG power 20%		77,65
– мощность ТГ 40% / TG power 40%		58,95
– мощность ТГ 60% / TG power 60%		40,45
– мощность ТГ 80% / TG power 80%		22,05
– мощность ТГ 100% / TG power 100%		3
Абсолютное давление пара на входе в ДУУ Absolute steam pressure at the inlet to the TDD	кгс/см ² kgf/cm ²	32
Температура пара на входе в ДУУ Steam temperature at the TDD inlet	°С	280
Абсолютное давление пара в главном конденсаторе Absolute steam pressure in the main condenser	кгс/см ² kgf/cm ²	0,05
Температура пара на выходе из ДУУ Steam temperature at the outlet of the remote control	°С	не более 120
Температура охлаждающего конденсата Cooling condensate temperature	°С	32

расположения отверстия на предыдущей решетке напротив перемычки на последующей.

Расчет процесса испарения капель конденсата в потоке пара был выполнен методом последовательных приближений по математическим моделям в системе Mathcad. Из составленных уравнений тепловых балансов определялись температуры и физические свойства

потока пара перед и после испарения впрыскиваемой жидкости. Имеющиеся зависимости для расчета процесса испарения [7; 8] показывают, что для полного испарения впрыскиваемой влаги необходима длина участка испарения не менее одного метра. Габаритные ограничения на высоту ДУУ в любом случае не позволяют выполнить испарительный участок требуемых габаритов. Таким образом, часть влаги попадает на восьмую дроссельную решетку и испарятся при течении пара в ее отверстиях.

В любом случае в разработанной конструкции ДУУ из-за увеличенной по сравнению с прототипами длины участка испарения до 500 мм (на предыдущих ДУУ около 200 мм) восьмая решетка находится в «облегченных» условиях по температурному режиму и эрозионному износу по сравнению с устройствами, находящимися в эксплуатации в настоящее время (например, на ледоколах проекта 10520).

Основные результаты расчета ДУУ в режиме максимальной нагрузки при-

ведены в таблице 2.

Из таблицы 2 следует, что давление пара в ДУУ снижается с более чем 3 МПа на входе до 43 кПа на выходе. Температура пара на выходе из ДУУ равна 105°С, что на 15°С меньше, чем требовалось по ТЗ. Более глубокое снижение давления в ДУУ невозможно, так как потребует увеличения габаритов ДУУ сверх указанных в ТЗ

Таблица 2. Основные результаты расчетов ДУУ в режиме максимальной нагрузки
Table 2. The main results of calculations of the TDD in the maximum load mode.

Наименование параметра / Parameter name	Номер решетки / Lattice number									За ДУУ For TDD
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Площадь набегания на решетку, м ² / Runaway area on the grate, m ²	0,045	0,225	0,171	0,190	0,413	0,346	0,349	0,506	1,191	–
Степень перфорации / Perforation rate	0,242	0,089	0,17	0,219	0,169	0,271	0,374	0,414	0,319	–
Расход пара по сечениям, кг/с / Steam consumption across sections, kg/s	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	40,3	40,3	40,3
Давление по сечениям, МПа / Cross-sectional pressure, MPa	3,138	2,023	1,305	0,841	0,542	0,349	0,225	0,145	0,079	0,043
Перепад давления в долях от критического / Differential pressure in fractions of critical	0,782	0,782	0,782	0,782	0,782	0,782	0,782	1	1	–
Температура по сечениям, °С / Cross-section temperature, °С	280	263,8	252,3	244,5	239,2	235,7	233,4	111	107,2	105
Скорость набегания пара на решетки, м/с / Velocity of steam on the grate, m/s	59,7	18,7	38,2	53,2	38,1	70,7	108,6	95,6	74,3	–
Скорость за решетками, м/с / Speed behind bars, m/s	92,9	29	59,3	82,6	59,1	109,7	168,6	174,9	136	–
Коэффициент расхода решеток / Coefficient of consumption of gratings	0,789	0,67	0,716	0,772	0,716	0,831	0,924	0,828	0,866	–

по высоте, и сечении. Окончательное расширение потока пара до давления в конденсаторе заканчивается в переходном патрубке конденсатора, как собственно и происходит в аналогичных устройствах, находящихся в эксплуатации. Скорости набегания пара на решетки местами значительны, но в любом случае число Маха в сечениях перед решетками не превышает 0,25, что говорит о правильном выборе геометрических характеристик ДУУ для обеспечения нормального процесса дросселирования пара. Дополнительно был выполнен расчет скоростей в узких сечениях проточной части ДУУ в режиме максимальной нагрузки: в зазоре между пятой решеткой и корпусом скорость составила 131 м/с, в основании шестой решетки 140 м/с, в зазоре между седьмой решеткой и корпусом 153 м/с. Несмотря на большие абсолютные значения этих скоростей, они существенно меньше скорости пара в отверстиях дроссельных решеток (400–450 м/с), следовательно, основная механическая нагрузка на решетки будет создаваться именно при протекании пара через отверстия.

Результаты расчетов основных характеристик ДУУ на переменных режимах работы приведены в таблице 3.

Распределение давления по сечениям ДУУ на переменных режимах работы турбоустановки приведены в таблице 4.

Из таблиц 3 и 4 следует, что на режимах работы турбоустановки, близким к номинальному, давление пара на выходе из ДУУ близко к давлению в конденсаторе, что обеспечивает минимальный уровень шума.

Математическое моделирование и расчеты форсунок для ДУУ выполнялись в системе Mathcad. Цель расчетов заключалась в определении геометрических характеристик их проточных частей и определении необходимой степени открытия регулятора расхода на группы форсунок при различных мощностях ДУУ.

Форсунки разделены на две группы: «а», «б» и постоянно работающую форсунку «с». Целью этого разделения было обеспечение большего перепада давления на форсунках при распыле воды при соответствующем алгоритме работы по сравнению с равномерным регулированием расхода воды через все форсунки одновременно. Это способствовало, в свою очередь, уменьшению среднего размера капель жидкости и, следовательно, ее более интенсивному испарению.

Регулирование расхода воды на форсунки осуществляется расходным клапаном, имеющим два независимых канала распределения расхода воды. Отбор давления в импульсную линию осуществляется из пространства между четвертой и пятой дроссельными решетками.

В режиме максимальной нагрузки, расход конденсата

Таблица 3. Основные характеристики работы ДУУ в переменных режимах
Table 3. Main characteristics of the remote control of the TDD in variable modes

Наименование параметра / Parameter name	Режим работы / Working hours							
	Максимальный сброс / Maximum discharge	20%	40%	50%	60%	80%	100%	110%
Расход пара на входе, т/ч / Steam consumption at the inlet, t/h	132,5	77,65	58,95	49,7	40,45	22,05	3	3
Давление пара перед первой решеткой ¹ , МПа / Steam pressure in front of the first grate ¹ , MPa	3,14	1,84	1,4	1,18	0,96	0,52	0,07	0,07
Температура пара перед первой решеткой, °С / Steam temperature in front of the first grate, °C	280	261	253,9	250,2	246,5	238,8	230,6	230,6
Давление пара за девятой решеткой, МПа / Steam pressure behind the ninth grate, MPa	0,043	0,027	0,02	0,017	0,014	0,007	0,005	0,005
Температура пара за девятой решеткой, °С / Steam temperature behind the ninth grate, °C	105	91,6	86,1	81	77,8	72,2	85,8	85,8
Расход охлаждающей воды ² , т/ч / Cooling water consumption ² , t/h	12,635	8,208	6,48	5,67	4,716	2,664	0,328	0,328
Расход охлаждающей воды на гр. форсунок «а», т/ч / Cooling water flow rate at nozzle group «a», t/h	5,6	5,6	5,6	5,352	4,397	2,341	0	0
Перепад давления на форсунках группы «а», МПа / Pressure drop across nozzles of group «a», MPa	0,541	0,538	0,538	0,491	0,332	0,095	–	–
Расход охлаждающей воды на гр. форсунок «б», т/ч / Cooling water flow rate at nozzle group «b», t/h	6,735	2,296	0,565	0	0	0	0	0
Перепад давления на форсунках группы «б», МПа / Pressure drop across nozzles of group «b», MPa	0,368	0,044	0,003	–	–	–	–	–
Расход охлаждающей воды через форсунку «с», т/ч / Cooling water consumption through the «c» nozzle, t/h	0,303	0,313	0,317	0,318	0,319	0,323	0,328	0,328

¹ Все значения давлений абсолютные.

² Исходя из коэффициента расхода клапана, равного 0,6

Таблица 4. Распределение давления по сечениям ДУУ
Table 4. Pressure distribution over the cross-sections of the TDD.

Сечение ДУУ / DUU section	Режим работы / Working hours							
	Максимальный сброс / Maximum discharge	20%	40%	50%	60%	80%	100%	110%
Давление на входе в ДУУ, МПа / Pressure at the entrance to the TDD, МПа	3.138	1.842	1.399	1.18	0.96	0.524	0.071	0.071
Давление за 1 решеткой, МПа / Pressure behind 1 grate, МПа	2.023	1.188	0.902	0.760	0.619	0.338	0.046	0.046
Давление за 2 решеткой, МПа / Pressure behind 2 grate, МПа	1.305	0.766	0.581	0.49	0.399	0.218	0.03	0.03
Давление за 3 решеткой, МПа / Pressure behind 3 grate, МПа	0.841	0.494	0.375	0.316	0.258	0.14	0.019	0.019
Давление за 4 решеткой, МПа / Pressure behind 4 grate, МПа	0.542	0.318	0.242	0.204	0.166	0.09	0.013	0.013
Давление за 5 решеткой, МПа / Pressure behind 5 grate, МПа	0.349	0.205	0.155	0.131	0.107	0.058	0.009	0.009
Давление за 6 решеткой, МПа / Pressure behind 6 grate, МПа	0.225	0.132	0.1	0.084	0.069	0.037	0.007	0.007
Давление за 7 решеткой, МПа / Pressure behind 7 grate, МПа	0.145	0.084	0.064	0.054	0.044	0.024	0.006	0.006
Давление за 8 решеткой, МПа / Pressure behind 8 grate, МПа	0.079	0.046	0.035	0.029	0.024	0.013	0.005	0.005
Давление за 9 решеткой, МПа / Pressure behind 9 grate, МПа	0.043	0.027	0.02	0.017	0.014	0.007	0.005	0.005

через форсунки группы «а» (3 штуки) равняется 5,6 т/ч и практически не меняется при снижении расхода пара на ДУУ до величины, соответствующей 50% мощности турбогенератора (ТГ). При дальнейшем уменьшении расхода пара на ДУУ (увеличении мощности ТГ от 50 до 100%) расход конденсата из форсунок группы «а» практически линейно уменьшается до нуля.

В режиме максимальной нагрузки расход конденсата через форсунки группы «б» (также 3 штуки) равняется 6,74 т/ч и линейно уменьшается до нуля при снижении расхода пара на ДУУ, соответствующему 50% мощности ТГ. При дальнейшем уменьшении расхода пара на ДУУ (увеличении мощности ТГ от 50 до 100%) распыл конденсата через форсунки группы «б» не осуществляется.

Форсунка «с» находится в постоянной работе с постоянным расходом около 0,3 т/ч. Небольшое увеличение расхода через эту форсунку при уменьшении расхода пара через ДУУ связано с увеличением противодавления в корпусе устройства. В режиме минимальной нагрузки ДУУ (при 100% мощности ТГ) она обеспечивает охлаждение поступающего в ДУУ пара расходом в 0,3 т/ч, который обеспечивает постоянное нахождение ДУУ в горячем резерве. Эта форсунка подключена напрямую к трубопроводу конденсата (минуя регулятор) через пакет дроссельных шайб. Шайбы необходимы для снижения давления воды перед форсункой. При этом увеличивается расчетный диаметр сопла (по сравнению с режимом работы без дроссельных шайб) и, таким образом, исключается возможное влияние на работу форсунки механических загрязнений, а также снижается скорость воды в форсунке для исключения

эрозионного износа, наиболее опасного для постоянно работающей форсунки.

Все форсунки конструктивно одинаковые и по принципу распыла относятся к струйно-центробежным (смешанным) форсункам. Различия имеются только в геометрических характеристиках проточных частей форсунок. Стоит отметить, что форсунки рассчитывались таким образом, чтобы вода гарантированно не попадала на стенки ДУУ (корневого угол распыла факела не превышал 60 градусов). Это позволило отказаться от установки защитного кожуха в ДУУ. Целесообразность применения именно этого типа форсунок была обусловлена более широкими возможностями по достижению требуемого угла распыла при равномерном распределении потока влаги по сечению факела распыла.

Основные результаты расчета форсунок приведены в таблице 5.

Расходы пара и охлаждающей воды в ДУУ во всем возможном диапазоне режимов работы приведены на рисунке 3.

Следует отметить, что при выполнении конструкторских проработок все варианты ДУУ и отдельные детали конструкции прошли процедуру расчета на прочность. Кроме того, форсунки прошли полный цикл испытаний (определение расходных характеристик, качества распыла воды) в соответствии с программой испытаний.

Выводы

1. Для атомной энергетической установки ледокола ЛК-60 разработана оригинальная конструкция ДУУ,

Таблица 5. Основные результаты расчета форсунок
Table 5. The main results of the calculation of nozzles

Наименование параметра / Parameter name	Группы форсунок / nozzle groups		Форсунка «с»
	«а»	«b»	
Количество в одной колонке ДУУ, штук / Quantity in one column TDD, pieces	3	3	1
Расход на одну форсунку в режиме максимальной нагрузки, т/ч / Consumption per nozzle at maximum load, t/h	1,875	2,245	0,303
Диаметр сопла, мм / Nozzle diameter, mm	5	6	2,2
Диаметр центрального канала, мм / Central channel diameter, mm	3,7	4,2	1,8
Количество винтовых канавок, штук / Number of screw grooves, pieces	6	6	6
Угол наклона винтовых канавок, градус / Angle of inclination of helical grooves, degree	20	20	15
Суммарная площадь винтовых канавок, мм ² / Total area of helical grooves, mm ²	59	71	22
Средний радиус винтовых каналов, мм / Average radius of screw channels, mm	8,3	8,2	9
Коэффициент расхода / Flow rate	0,808	0,815	0,786
Корневой угол факела, градус / Torch root angle, degree	57	55	61
Осевая скорость воды на выходе из форсунки в режиме максимальной нагрузки, м/с / Axial water velocity at the outlet of the nozzle at maximum load, m/s	26,6	22,2	22,3
Средний объемно-поверхностный диаметр капли, мм / Average volumetric surface diameter of a drop, mm	0,2	0,3	0,1

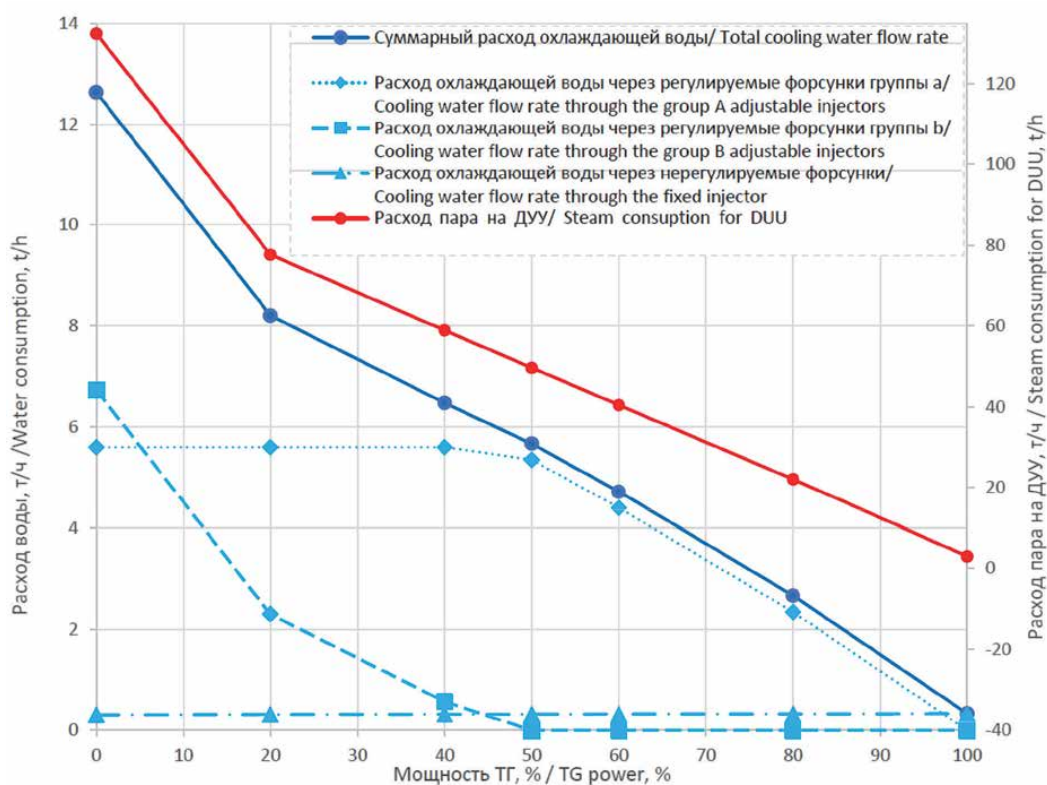


Рисунок 3. Расходы пара и охлаждающей воды в ДУУ на различных режимах работы (0% мощность ТГ соответствует аварийному режиму).
Figure 3. Steam and cooling water consumption in the remote control system at different operating modes (0% TG power corresponds to emergency mode).

полностью удовлетворяющая требованиям ТЗ.

2. Методом последовательных расчетов при вариации перфорации, количества решеток, расстояния между ними на участке дросселирования получено, что число Маха в сечениях перед решетками не превы-

шает 0,25, что говорит о правильном выборе геометрических характеристик ДУУ для обеспечения нормального процесса дросселирования пара и надежности устройства.

3. Результаты швартовных и ходовых испытаний ледо-

кола ЛК-60 подтвердили заявленные параметры работы ДУУ во всем диапазоне эксплуатационных режимов.

Список использованных источников

1. Сухорукова Е. А. Повышение надежности турбоустановок ТЭС и АЭС, в системе регенерации которых используются подогреватели смешивающего типа / Е. А. Сухорукова, Т. Г. Синцова, Е. К. Николаенкова, С. П. Колпаков // Надежность и безопасность энергетики 2020; 13(1): 35–40.
2. Готовский М. А. Актуальные проблемы систем регенерации паротурбинных установок. Конструкторские и научные проблемы совершенствования систем регенерации питательной воды и результаты их решения: монография / М. А. Готовский, Ю. Г. Сухоруков. LAP Lambert Academic Publishing 2017;: 239.
3. Ермолов В. Ф. Бездеаэрационные тепловые схемы / В. Ф. Ермолов, Н. Н. Трифонов, Ю. Г. Сухоруков // Машиностроение. Энциклопедия в 40 т. Т. IV-19 Турбинные установки. – М.: Машиностроение 2016;: 165–174.
4. Ледуховский Г. В. Исследование технологических процессов атмосферной деаэрации воды / Г. В. Ледуховский, В. Н. Виноградов, С. Д. Горшенин, А. А. Коротков / под общ. ред. Г. В. Ледуховского; ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина» 2016;: 420.
5. Есин С. Б. Исследование бездеаэрационной тепловой схемы и ее оборудования при переменных режимах работы энергоблока / С. Б. Есин, Н. Н. Трифонов, Ю. Г. Сухоруков, П. В. Егоров // 2 Всероссийская спец. науч.-практическая конференция молодых специалистов «Современные технологии в энергетике»: – М.: 2018;: 107–112.
6. Янышев Д. С. Сеточные модели для решения инженерных теплофизических задач в среде ANSYS / Д. С. Янышев, Л. В. Быков, А. М. Молчанов. – М.: Изд-во Ленанд 2018;: 264.
7. Готовский М. А. Теплообмен в технологических установках / М. А. Готовский, В. А. Сулов. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2017;: 420.

8. Гогонин, И.И. Теплообмен при пузырьковом кипении / И.И. Гогонин. – Новосибирск;: СО РАН 2018;: 227.

References

1. Sukhorukova E. A. Improving the reliability of turbine units of TPPs and NPPs in the regeneration system of which mixing heaters are used / E. A. Sukhorukova, T. G. Sincova, E. K. Nikolaenkova, S. P. Kolpakov // Safety and Reliability of Power Industry 2020; 13(1): 35–40.
2. Gotovsky M. A., Sukhorukov Yu.G. Actual problems of steam turbine plant regeneration systems. Design and scientific problems of improving feedwater regeneration systems and the results of their solution. Lap Lambert Academic Publishing. 2015;: 239.
3. Ermolov V. F. Deaeration-free thermal circuits / V. F. Ermolov, N. N. Trifonov, Yu. G. Sukhorukov // Mechanical Engineering. Encyclopedia in 40 t. T. IV-19 Turbine units. – М.: Mechanical Engineering, 2015;: 165–174.
4. Ledukhovskiy G. V. Research of technological processes of atmospheric deaeration of water / G. V. Ledukhovskiy, V. N. Vinogradov, S. D. Gorshenin, A. A. Korotkov / under the total. ed. G.V. Ledukhovskiy; FGBOUVO "Ivanovo state. energetic. un-t them. IN AND. Lenin." 2016;: 420.
5. Yesin S. B. Investigation of a deaeration-free thermal circuit and its equipment under variable operating conditions of a power unit / S. B. Yesin, N. N. Trifonov, Yu. G. Sukhorukov, P. V. Egorov // 2 All-Russian special. scientific and practical conference of young specialists (with international participation) "Modern technologies in the energy sector": Sat. reports. – М.: 2018;: 107–112.
6. Yanyshv D. S. Grid models for solving engineering thermophysical problems in the ANSYS environment / D. S. Yanyshv, L. V. Bykov, A. M. Molchanov. – М.: Publishing house Lenand 2018;: 264.
7. Gotovsky M. A. Heat exchange in technological installations / M. A. Gotovsky, V. A. Suslov. – SPb.: Publishing house of the Polytechnic University 2017;: 420.
8. Gogonin I. I. Heat exchange at bubble boiling / I. I. Gogonin. – Novosibirsk;: SB RAS 2018;: 227.

