

УДК 621.175

Исследование влияния компоновки трубного пучка на эффективность теплообмена конденсатора на низкокипящем рабочем теле

Ганков Максим Сергеевич

gankovms@student.bmstu.ru

Ильичев Владимир Юрьевич

ilyichev.vyu@bmstu.ru

КФ МГТУ им Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Исследовано влияние различных компоновочных схем трубных пучков кожухотрубного конденсатора пара низкокипящего рабочего тела — изопентана для теплоутилизационной установки. Представлены результаты расчетов для каждой из них, на основе которых сделан вывод о предпочтительной конструкции трубного пучка.

Ключевые слова конденсация, кожухотрубный конденсатор, низкокипящие рабочие тела, трубный пучок

Как известно, конденсация отработавшего в турбине пара является одним из основных способов повышения эффективности паротурбинных установок (ПТУ), а также уменьшения затрат на водоподготовку в целом, за счет отсутствия выброса рабочего тела в атмосферу [1]. При этом сами конденсаторы представляют собой теплообменные аппараты, в которых данный процесс происходит за счет непрерывного отвода теплоты от поступающего в него пара охлаждающей средой. Их эффективность во многом определяется коэффициентом теплопередачи, величина которого зависит от теплофизических свойств самих теплоносителей, их режима течения, а также термического сопротивления стенки. Стоит отметить, что при фиксированном среднелогарифмическом температурном напоре с увеличением коэффициента теплопередачи уменьшается величина необходимой теплообменной поверхности. По этой причине наибольшее распространение получили кожухотрубные конденсаторы, в которых в качестве охлаждающей среды используется вода, однако в местах, где доступ к ней затруднен, используются воздушные конденсаторы [2].

Немаловажным является то, что эффективность теплообмена с паровой стороны лимитируется термическим сопротивлением пленки конденсата, что приводит к необходимости применения различных решений по интенсификации теплообмена с наружной поверхности: профилирования трубок [3], использования высокоэффективных модулей [4], перехода к капельной конденсации [5] и др. Цель данной работы — исследование влияния компоновки трубного пучка на эффективность конденсации пара изопентана в кожухотрубном конденсаторе, проектируемого для теплоутилизационной паротурбинной установки. Рассматривались варианты двух- и четырехходовых конденсаторов с различным расположением ходов в конденсаторе, а также различным относительным периметром набегания пара $\bar{f}$ на трубный пучок.

Проектные расчеты производились по классической методике расчета теплообменных аппаратов изложенной, например, в работе [1], при этом процесс конденсации считался для неподвижного пара на горизонтальном трубном пучке. На следующем этапе вводилась поправка, учитывающая влияние компоновки трубного пучка и скорости натекания пара на него по методике Калужского турбинного завода [2], при этом расчет имел итерационный характер, так как в процессе расчета возникала необходимость уточнения скорости движения пара. Для определения теплофизических свойства рабочих тел использовалась библиотека CoolProp для языка программирования Python [6]. В качестве исходных данных принимались значения, полученные в ходе расчета тепловой схемы теплоутилизационной паротурбинной установки, к которым относится расход рабочего тела $G_p = 4,2$ кг/с, температура насыщения пара $t_s = 32$ °С, температура пара на выходе из турбины $t_1 = 76,7$ °С, а также количество отводимой теплоты $Q = 1,77$ МВт. Также принималось, что пар конденсируется на латунных трубках с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 105$ Вт/м·°С с наружным диаметром $d_n = 0,02$ м и внутренним $d_{вн} = 0,018$ м. При этом принималось, что в трубки подается охлаждающая вода с начальной температурой $t_2 = 15$ °С и ее нагрев составляет $\Delta t_2 = 5$ °С, полученными из предварительных проработок. Скорость движения воды в трубках принималась $c = 1,5$ м/с.

Всего в работе было рассмотрено пять вариантов компоновок трубных пучков:

- цилиндрический двухходовой с $\bar{f} = 0,0042$;
- цилиндрический двухходовой с $\bar{f} = 0,02$;
- цилиндрический четырехходовой с $\bar{f} = 0,0042$;
- сужающийся противоточный четырехходовой с $\bar{f} = 0,0042$ (см. рисунок, а);
- квадратный противоточный четырехходовой с $\bar{f} = 0,0063$ (см. рисунок, б).

Результаты произведенных расчетов конденсаторов с вышеприведенными компоновками представлены в таблице.

Из таблицы видно, что двухходовые схемы имеют низкие коэффициенты теплоотдачи по пару и большие длины трубок, при этом пучок с увеличенным периметром набегания в такой схеме проигрывает пучку с небольшим значением данного параметра. Сравнивая варианты (1) и (3), можно заметить, что только переход к четырехходовой схеме способствует увеличению теплопередачи на 27 % и уменьшению длины трубок примерно в 2,5 раза. Однако схема (3) имеет недостаток в виде неравномерности распределения температур воды по радиусу, что привело к схеме (4). Схема (4) имеет наиболее целесообразную сужающуюся компоновку, что объясняется уменьшением объема пара по мере конденсации, однако трапециевидная форма является технологически сложной, что усложняет конструкцию и изготовление данного конденсатора, что привело к компромиссу в виде схемы (5). Последний представленный вариант имеет несколько меньшую эффективность теплооб-

мена, однако весьма простую форму трубной доски. Также за счет увеличения периметра набегания удалось несколько уменьшить глубину трубного пучка, что должно уменьшить его гидравлическое сопротивление.

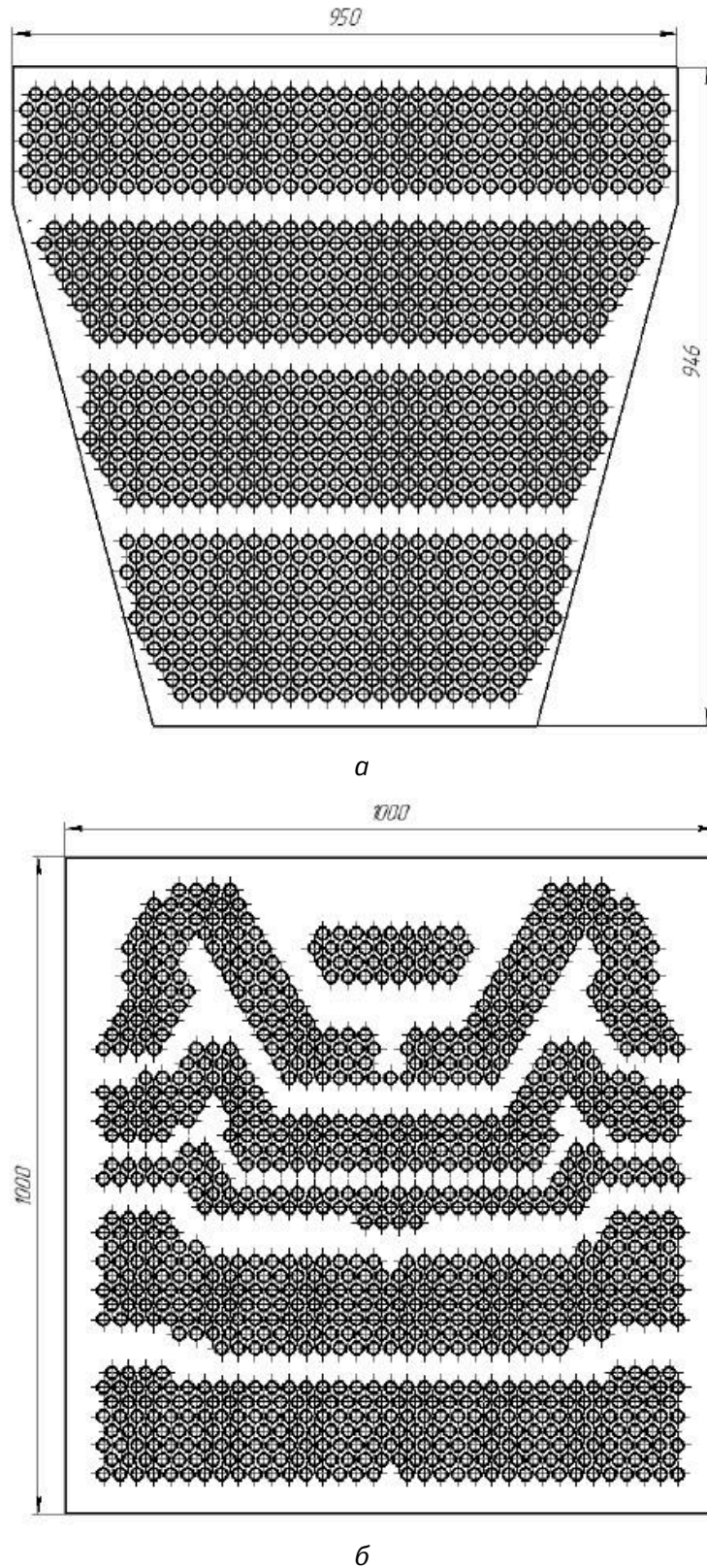


Рис. 1. Схемы вариантов пучков (4) и (5):
a — вариант (4); *б* — вариант (5)

Результаты расчетов

№ варианта	1	2	3	4	5
$\bar{f}$	0,0042	0,02	0,0042	0,0042	0,0063
Число ходов, штук	2	2	4	4	4
Коэффициент теплоотдачи воды, Вт/м ² ·К	5675,2	5665,0	5708,6	5708,6	5688,6
Скорость набегания пара, м/с	2,98	0,54	7,57	7,57	2,20
Коэффициент теплоотдачи пара, Вт/м ² ·К	1458,61	1305,05	2029,26	2029,26	1674,23
Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² ·К	22,02	20,21	28,00	28,00	24,40
Длина трубного пучка, м	3,58	3,90	1,41	1,41	1,61
Суммарное число трубок, штук	498	498	996	996	996

По результатам проделанной работы можно сделать вывод, что при проектировании конденсаторов для изопентана целесообразным является переход к четырехходовым схемам с небольшими относительными периметрами набегания пара на пучок. Также наиболее эффективным является использование сужающихся трубных пучков, или же квадратных с противоточной схемой.

Литература

- [1] Бродов Ю.М. *Теплообменники энергетических установок*. Екатеринбург, «Сократ», 2003, 965 с.
- [2] Федоров В.А., Мильман О.О. *Конденсаторы паротурбинных установок*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013, 558 с.
- [3] Лебедев О.О. *Трубный пучок конденсатора пара*. Патент 2725738 РФ, 2020, бюл. № 19, 18 с.
- [4] Бродов Ю.М., Аронсон К.Э., Рябчиков А.Ю. *Современная ситуация и тенденции в проектировании и эксплуатации конденсаторов мощных паровых турбин ТЭС и АЭС*. Екатеринбург, УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2019, 104 с.
- [5] Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Чугунков Д.В. Исследование смачивания и конденсации на горизонтальной трубе с покрытием. *Тепловые процессы в технике*, 2023, т. 15, № 2, с. 72–78. <https://doi.org/10.34759/tpt-2023-15-2-72-78>
- [6] *CoolProp*. URL: <http://www.coolprop.org> (дата обращения 28.02.2025).

Investigation of the effect of the tube bundle configuration on the efficiency of heat transfer in a condenser with a low-boiling liquid

Gankov Maksim Sergeevich

gankovms@student.bmstu.ru

Ilyichev Vladimir Yurievich

ilyichev.vyu@bmstu.ru

Kaluga Branch of BMSTU, Kaluga, Russia

The effect of various arrangement schemes of tube bundles of a shell-and-tube steam condenser with a low-boiling working fluid, isopentane, on a heat recovery unit is investigated. The results of calculations for each of them are presented, on the basis of which a conclusion is drawn about the preferred design of the tube bundle.

Keywords: *condensation, shell-and-tube condenser, low-boiling working fluids, tube bundle*