

УДК 621.125

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_43

Оригинальное исследование



Расчетное исследование эффективного винтового конденсатора пара

О.О. Лебедев

Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит», Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В статье рассматривается процесс конденсации пара в конденсаторе энергетической установки. Конденсатор пара — необходимый холодный источник в термодинамическом процессе энергетической установки, а также крупный, металлоемкий элемент, определяющий габаритные размеры энергетической установки. Новым техническим решением в вопросе повышения эффективности конденсатора пара круглой формы является предлагаемая конструкция — винтовой трубный пучок конденсатора пара. Теплообменные трубки данного пучка имеют овальную форму и закручены по винтовой траектории.

Методы. Проводятся расчеты трубного пучка конденсатора пара с различными параметрами овальности и винтовой закрутки. Для расчета использовали новый алгоритм — послойный расчет трубного пучка. Трубный пучок конденсатора разбивается на слои конденсации по мере движения пара от периферии к центру. Для каждого слоя осуществляется расчет коэффициентов теплообмена, площади поверхности конденсации, температурных коэффициентов и количества сконденсировавшегося тепла.

Результаты. Полученные результаты сравнивали с характеристиками трубного пучка парового конденсатора с прямолинейными охлаждающими трубками.

Выводы. По результатам расчетного исследования — максимального эффекта позволяет достичь совместное использование закручивания по винтовой траектории с изменением формы теплообменной трубки от круглого сечения до овального.

Ключевые слова: конденсатор; энергетическая установка; пар; тепловой обмен.

Как цитировать

Лебедев О.О. Расчетное исследование эффективного винтового конденсатора пара // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 43–50. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_43

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_43

Original study article

Calculation study of an efficient screw-type steam condenser

Oleg O. Lebedev

Saint Petersburg Marine Engineering Bureau «Malachite», Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The article examines steam condensation in a power plant condenser. The steam condenser is an indispensable cold source in the thermodynamic process of a power plant and the condenser is a large, metal-intensive component that determines the overall dimensions of the power plant. A new solution used to increase performance of a round steam condenser is the proposed design of a condenser tube bundle, a screw-type tube bundle for a steam condenser. Oval heat exchange tubes of the proposed bundle are helically twisted.

METHODS: The article calculates a tube bundle for a steam condenser with different out-of-roundness and swirl parameters using a new algorithm of nodal bundle calculation. The condenser tube bundle is broken down into condensation layers as the steam moves from the periphery to the center. For each layer, the heat transfer ratio, condensation surface area, temperature factors and the condensed heat are calculated.

RESULTS: The calculation results are compared with tube bundle performance of a steam condenser with linear cooling tubes.

CONCLUSIONS: The calculation shows that the maximum effect is achieved by the helical twisting and the reshaping of the circular heat exchange tube to an out-of-round one.

Keywords: condenser; power plant; steam; heat exchange.

To cite this article

Lebedev OO. Calculation study of an efficient screw-type steam condenser. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):43–50. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_43

Received: 10.01.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 20.03.2025

Термодинамический цикл паротурбинных установок (ПТУ) предполагает обязательное наличие холодного источника в конце процесса расширения водяного пара в турбине.

В качестве такого источника используется составная часть ПТУ, называемая конденсационной установкой. Главной частью конденсационной установки является конденсатор пара.

Конденсатор пара в энергетической установке — крупногабаритный, металлоемкий, сложный теплообменный аппарат, выполняющий функцию необходимого «холодного» источника в термодинамическом цикле энергетических установок [1].

Традиционное техническое решение конструкции конденсатора пара, используемое в настоящее время в судостроении, — отработавший пар поступает на цилиндрический трубный пучок, состоящий из прямолинейных теплообменных трубок круглого сечения, внутри которых протекает охлаждающая вода. Пар движется от периферии к центру трубного пучка, взаимодействует с охлаждающей средой и конденсируется.

Экспериментальные исследования существующих конструкций трубных пучков показали: по глубине пучка по ходу пара тепловые нагрузки уменьшаются в 5–8 раз, что объясняется снижением скорости пара из-за непропорционального уменьшения проходного сечения по пару по отношению к изменению расхода пара.

Сохранение высоких значений тепловых нагрузок по всей поверхности теплообмена и тем самым уменьшение габаритов и металлоемкости конденсаторов возможно, если формировать проходное сечение по пару определенным образом, чтобы обеспечить поддержание постоянной скорости пара на всем пути его движения.

Этому принципу оптимизации формирования проходного сечения по пару, обеспечивающего максимальную эффективность теплообмена, соответствует трубный пучок треугольной формы (рис. 1) [2]. Однако данное

техническое решение не вписывается в общепринятые формы корпусов и водяных камер, что существенно затрудняет реализацию преимущества интенсификации процесса теплообмена для улучшения массогабаритных характеристик по сравнению с трубными пучками цилиндрической формы.

Повысить эффективность теплообмена и тем самым улучшить габаритные характеристики трубных пучков круглой формы можно, если, не изменяя шага разбивки трубного пучка, спрофилировать проходное сечение по пару таким образом, чтобы скорость движения пара на всем пути следования имела бы постоянное, оптимальное значение (рис. 2). Поддержание постоянной скорости пара в межтрубном пространстве при сохранении круглой формы и технологии заделки трубок в трубных досках достигается применением двух способов формирования геометрии теплообменных трубок:

- трубки закручены под углом по винтовой траектории;
- изменение овальности теплообменных трубок.

При движении пара к центру трубного пучка ось овальности разворачивается от радиального положения до положения перпендикулярно движению пара.

Новым техническим решением в вопросе повышения эффективности конденсатора пара круглой формы является конструкция трубного пучка конденсатора — винтовой трубный пучок конденсатора пара [3, 4].

Для расчета винтового конденсатора пара разработана методика послойного теплового расчета по алгоритму расчета винтового трубного пучка конденсатора пара [5].

Алгоритм теплового расчета винтового конденсатора заключается в следующем:

- трубный пучок конденсатора в поперечном сечении разбивается на слои, каждый из которых является рядом охлаждающих трубок на одном расчетном радиусе по направлению движения пара от периферии к центру трубного пучка;

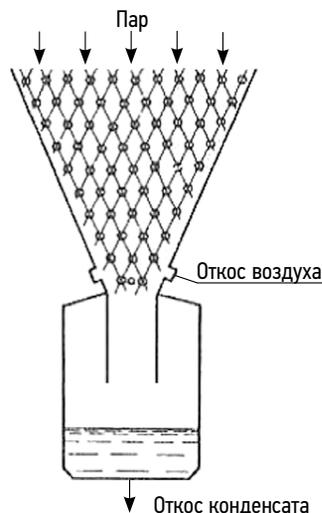


Рис. 1. Трубный пучок треугольной формы [2].
Fig. 1. Triangular tube bundle [2].

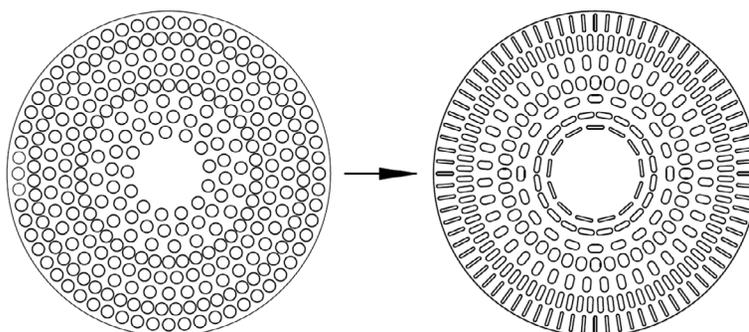


Рис. 2. Изменение геометрии трубного пучка.
Fig. 2. Changing the shape of the tube bundle.

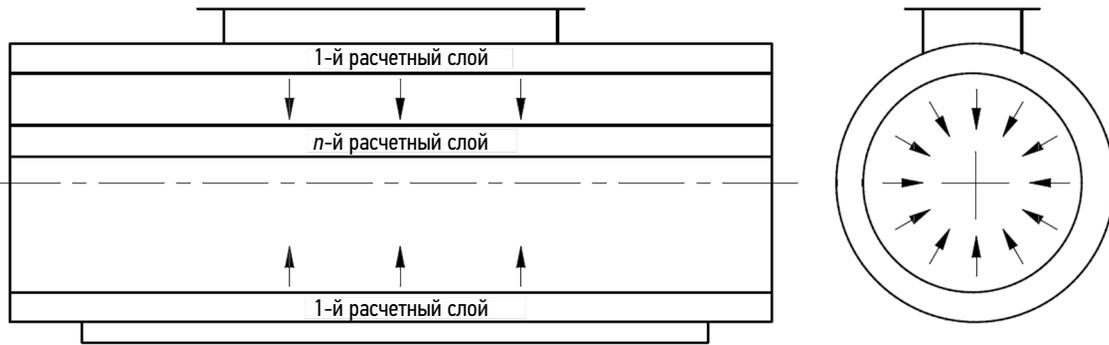


Рис. 3. Послойный тепловой расчет конденсатора.
Fig. 3. Nodal thermal calculation of a condenser.

- для каждого слоя (ряда трубок) производится тепловой расчет по схеме «охлаждающая вода — стенка трубки — паровоздушная смесь» («вода — стенка — пар»);
- на каждом слое определяются оптимальная конструкция охлаждающих трубок — овальность и угол закрутки, при которой обеспечивается отвод максимального количества тепла;
- после получения оптимальных параметров конструкции теплообменных трубок на слое производится переход на следующий (более нижний) слой, начальными параметрами расчета для которого являются значения, полученные на предыдущем слое (рис. 3).

Для каждого слоя теплообменных трубок производится тепловой расчет, в основе которого анализ определения количества теплоты, отводимого конденсатором от пара в охлаждающую воду, которое определяется по формуле:

$$Q_{\text{конд.}} = K_t \cdot F_t \cdot \Delta t. \quad (1)$$

Для исследования влияния угла закрутки и овальности на тепловые характеристики конденсатора выполнены следующие расчеты:

- расчет конденсатора пара с прямолинейными круглыми трубками;
 - расчет отдельного слоя конденсатора с изменением овальности без изменения угла закрутки;
 - расчет отдельного слоя конденсатора с изменением угла закрутки без изменения овальности;
 - расчет конденсатора пара с закруткой трубок и постоянной овальностью;
 - расчет конденсатора пара с закруткой трубок и переменной овальностью.
1. Расчет конденсатора пара с прямолинейными круглыми трубками.
Расчетная зона — конденсатор в целом.
Овальность — постоянная (16 мм, трубки круглые).
Угол закрутки — отсутствует (конденсатор прямолинейный).
Результаты расчета приведены в табл. 1.
Количество сконденсированного тепла в зависимости от слоя указано на рис. 4.
По результатам рассмотрения графика (рис. 4) можно сделать следующие выводы:
 - количество сконденсированного пара (количество отведенного тепла) падает при движении от периферии к центру.
 2. Расчет отдельного слоя конденсатора с изменением овальности без изменения закрутки.
Расчетная зона — первый слой.
Овальность — переменная от 16 до 21 мм (большой диаметр).
Угол закрутки — отсутствует.
Результаты расчета:
Количество сконденсированного тепла в зависимости от овальности представлено на рис. 5.
По результатам рассмотрения графика (рис. 5) можно сделать следующие выводы:
 - количество сконденсированного пара падает с увеличением овальности, что объясняется уменьшением парового сопротивления и, соответственно, падением скорости пара.

Таблица 1. Результаты расчета конденсатора пара с прямолинейными круглыми трубками

Table 1. Calculation of a steam condenser with circular line tubes

Параметр конденсатора	Значение
Общее число трубок, шт.	9081
Общая поверхность теплообмена, м ²	2966,99
Кол-во теплоты, ккал	76 274 964,64

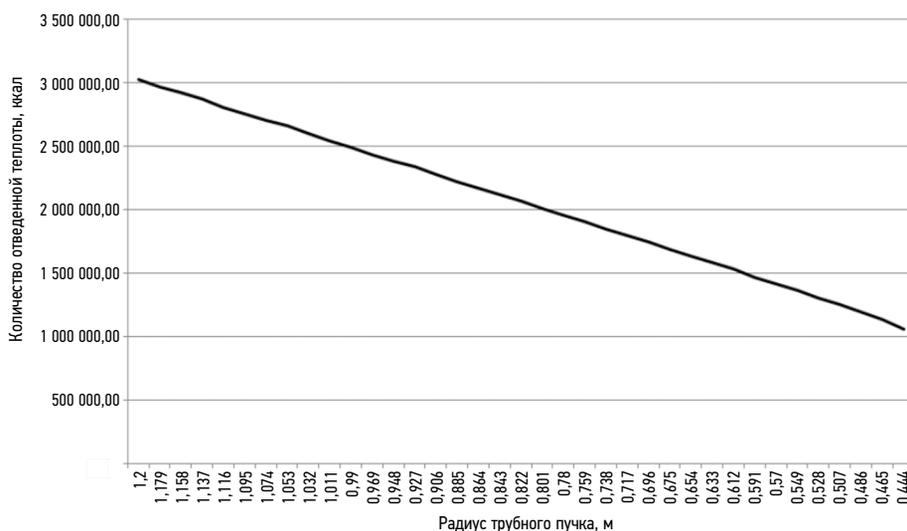


Рис. 4. Количество отведенной теплоты, ккал.
Fig. 4. Rejected heat, kcal.

3. Расчет отдельного слоя конденсатора с изменением закрутки без изменения овальности.

Расчетная зона — первый слой.

Овальность — без изменения (16 мм, трубка круглая).

Угол закрутки — от 9 до 35 градусов.

Результаты расчета представлены на рис. 6.

По результатам рассмотрения графика (рис. 6) можно сделать следующие выводы:

- количество сконденсировавшегося пара растет;
- скорость пара растет (до недопустимых значений).

4. Расчет отдельного слоя конденсатора с изменением закрутки и овальности.

Расчетная зона — первый слой.

Овальность — переменная от 16 до 20 мм (большой диаметр).

Угол закрутки — от 0 до 61 градуса (в зависимости от установленной максимальной скорости пара).

Установленная максимальная скорость пара — 87, 100 и 200 м/с.

Результаты расчета представлены на рис. 7.

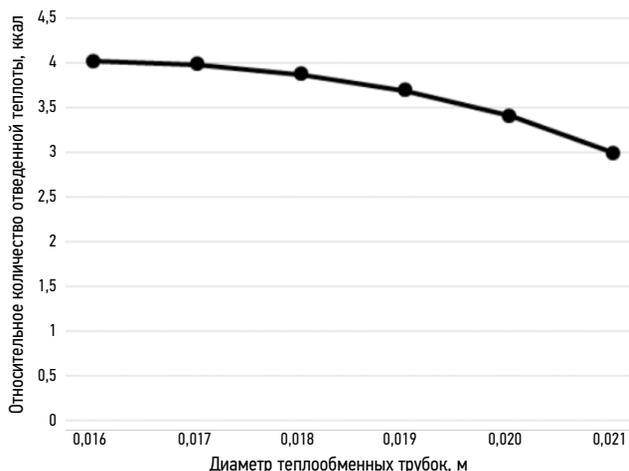


Рис. 5. Относительное изменение количества отведенной теплоты, %.
Fig. 5. Fractional variation of rejected heat, %.

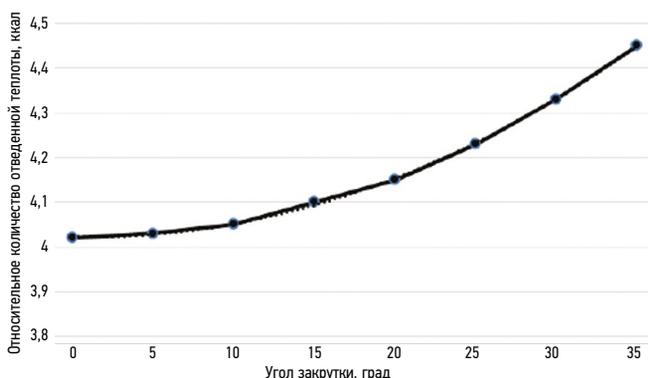


Рис. 6. Относительное изменение количества отведенной теплоты, %.
Fig. 6. Fractional variation of rejected heat, %.

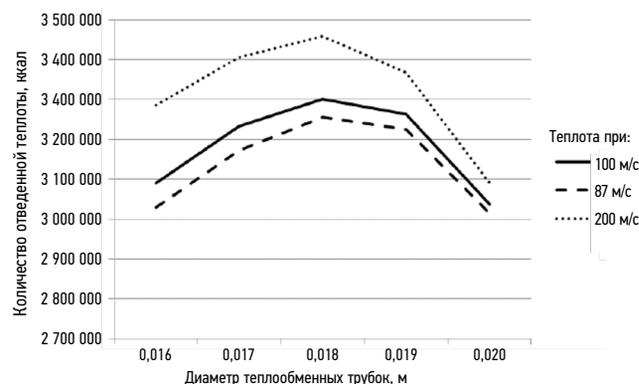


Рис. 7. Количество отведенной теплоты при разных скоростях пара, ккал.
Fig. 7. Rejected heat at different steam velocities, kcal.

По результатам рассмотрения графиков (рис. 7) можно сделать следующие выводы:

- максимальное количество сконденсировавшегося пара достигается на среднем значении овальности 18 мм;
- значение угла закрутки зависит от допустимой максимальной скорости пара;
- существует оптимальное значение угла закрутки и степени овальности, при которых достигается максимальное значение количества отводимой тепловой энергии.

5. Расчет конденсатора пара с изменением закрутки с постоянными круглыми трубками.

Расчетная зона — конденсатор в целом.
Овальность — постоянная (16 мм, трубки круглые).
Угол закрутки — переменный от 9 до 39 градусов.
Результаты расчета приведены в табл. 2.

По результатам рассмотрения графика (рис. 8) можно сделать следующие выводы:

- уменьшение общего количества трубок по сравнению с прямолинейным конденсатором на 6,6 %;
- увеличение площади теплообмена по сравнению с прямолинейным конденсатором на 3,8 % в тех же габаритах трубного пучка (длина и диаметр).

Таблица 2. Результаты расчета конденсатора пара с изменением закрутки с постоянными круглыми трубками

Table 2. Calculation of a variable swirl steam condenser with constant circular tubes

Параметр конденсатора	Значение
Общее число трубок, шт.	8514
Общая поверхность теплообмена, м ²	3084,52
Кол-во теплоты, ккал	75 498 878,36
Улучшение по количеству трубок, %	+6,66
Улучшение по площади поверхности, %	-3,81

6. Расчет конденсатора пара с изменением угла закрутки с постоянными овальными трубками.

Расчетная зона — конденсатор в целом.
Овальность — постоянная (18 мм, трубки овальные).
Угол закрутки — переменный от 38,5 до 52,5 градусов.
Результаты расчета представлены в табл. 3.

По результатам рассмотрения графика (рис. 9) можно сделать следующие выводы:

- уменьшение общего количества трубок по сравнению с прямолинейным конденсатором на 13,2 %;
- увеличение площади теплообмена по сравнению с прямолинейным конденсатором на 20,4 % в тех же габаритах трубного пучка (длина и диаметр).

7. Расчет конденсатора пара с изменением угла закрутки и изменением овальности.

Расчетная зона — конденсатор в целом.
Овальность — переменная (от 19 мм на периферии до 17 мм в центре).

Угол закрутки — переменный от 41 до 50,5 градусов.
Результаты расчета представлены в табл. 4.

По результатам рассмотрения графика (рис. 10) можно сделать следующие выводы:

- уменьшение общего количества трубок по сравнению с прямолинейным конденсатором на 13,2 %;

Таблица 3. Результаты расчета конденсатора пара с изменением угла закрутки с постоянными овальными трубками

Table 3. Calculation of a variable swirl steam condenser with constant oval tubes

Параметр конденсатора	Значение
Общее число трубок, шт.	8023
Общая поверхность теплообмена, м ²	3727,81
Кол-во теплоты, ккал	75 408 460,55
Улучшение по количеству трубок, %	+13,187
Улучшение по площади поверхности, %	-20,409

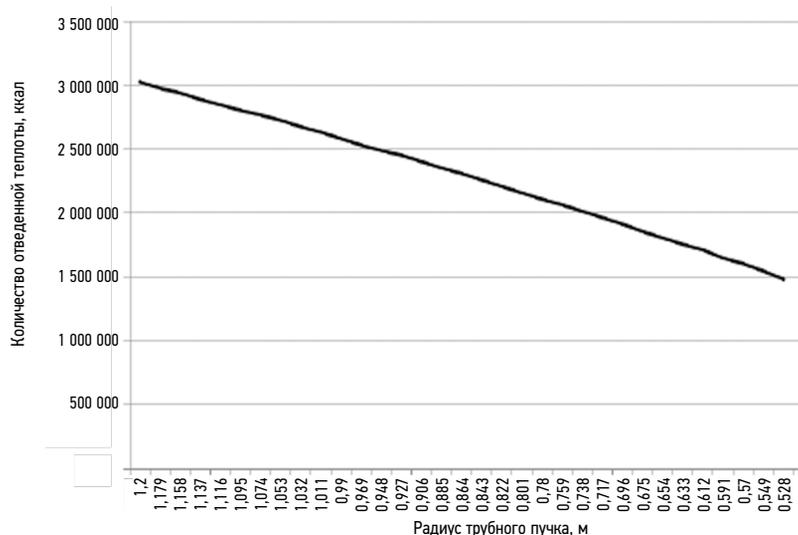


Рис. 8. Количество отведенной теплоты трубного пучка с винтовыми круглыми трубками, ккал.

Fig. 8. Heat rejected by a tube bundle with helical circular tubes, kcal.

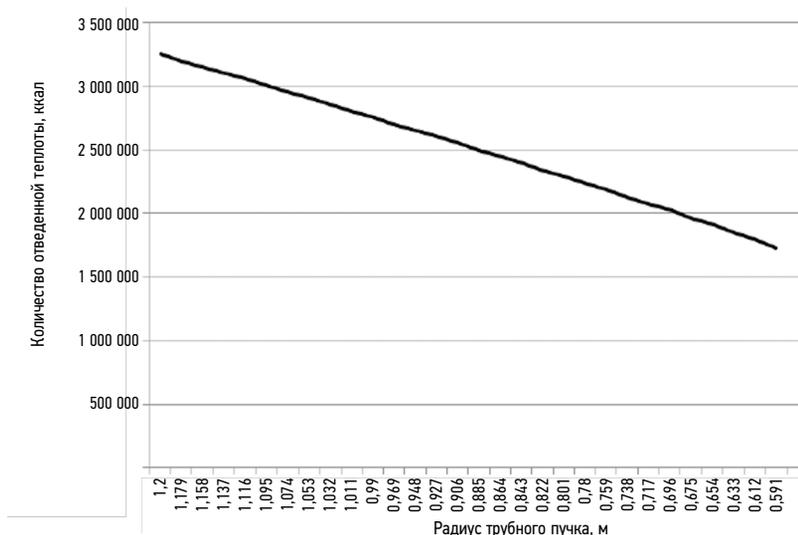


Рис. 9. Количество отведенной теплоты трубного пучка с винтовыми овальными трубками, ккал.
Fig. 9. Heat rejected by a tube bundle with helical oval tubes, kcal.

– увеличение площади теплообмена по сравнению с прямолинейным конденсатором на 22,3 % в тех же габаритах трубного пучка (длина и диаметр).

Таблица 4. Результаты расчета конденсатора пара с изменением угла закрутки и изменением овальности

Table 4. Calculation of a variable swirl and out-of-roundness steam condenser

Параметр конденсатора	Значение
Общее число трубок, шт.	8023
Общая поверхность, м ²	3815,15
Кол-во теплоты, ккал	75 152 276,73
Улучшение по количеству трубок, труб, %	+13,187
Улучшение по площади поверхности, %	-22,231

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное расчетное исследование по эффективности винтового конденсатора позволяет отметить следующее:

Изменение теплообменных трубок от круглого сечения до овального позволяет в широком диапазоне изменять скорость пара.

Изменение формы сечения теплообменных трубок от круглого сечения до овального приводит к уменьшению проходного сечения по охлаждающей воде, что снижает

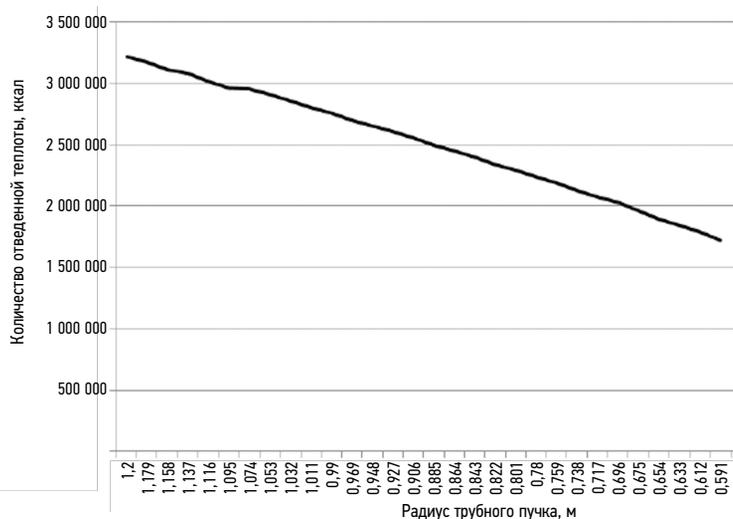


Рис. 10. Количество отведенной теплоты трубного пучка с винтовыми трубками, ккал.
Fig. 10. Heat rejected by a tube bundle with helical circular tubes, kcal.

эффективность теплообмена за счет снижения теплового напора.

Закручивание теплообменных трубок по винтовой траектории позволяет разместить большую поверхность теплообмена по сравнению с прямыми трубками и тем самым увеличить эффективность теплообмена.

Максимальный эффект позволяет достичь совместное использование (для формирования поверхности теплообмена) закручивания по винтовой траектории с изменением формы теплообменной трубки от круглого сечения до овального.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чистяков В.А., Архипов Г.А. Комплексный метод проектирования конденсационных установок. В кн.: Труды Ленинградского кораблестроительного института. 1990. С. 4–15.
2. Шкловер Г.Г., Мильман О.О. Исследование и расчет конденсационных устройств паровых турбин. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 240 с.
3. Патент № 2725738/ 2020. Лебедев О.О. Трубный пучок конденсатора пара.

REFERENCES

1. Chistyakov VA, Arkhipov GA. Complex method of design of condensation plants. In: *Proceedings of the Leningrad shipbuilding institute*. 1990. P. 4–15. (In Russ.)
2. Shklover GG, Millman OO. *Research and calculation of steam turbine condensing devices*. Moscow: Energoatomizdat; 1985. 240 p. (In Russ.)
3. Patent N 2725738/ 2020. Lebedev OO. Pipe bundle of steam condenser. (In Russ.)

ОБ АВТОРЕ

Олег Олегович Лебедев;

адрес: Россия, 196135, Санкт-Петербург, ул. Фрунзе, д. 18;
eLibrary SPIN: 8549-3254; e-mail: oo-lebedev@mail.ru

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The author declares that they have no competing interests.

4. Лебедев О.О. Разработка трубного пучка рациональной конструкции для конденсатора паровых турбин // Морской вестник. 2019. № 3. С. 80–81. EDN: MIDYOT

5. Лебедев О.О. Алгоритм расчета винтового конденсатора пара // Судостроение. 2020. № 5. С. 23–25. EDN: PUXITH

4. Lebedev OO. Development of tube bundle of rational design for steam turbine condenser. *Marine Bulletin*. 2019;(3):80–81. EDN: MIDYOT (In Russ.)

5. Lebedev OO. Calculation algorithm for screw-shaped condenser of steam turbines. *Shipbuilding*. 2020;(5):23–25. EDN: PUXITH

AUTHOR INFO

Oleg O. Lebedev;

address: 18 Frunze st, Saint Petersburg, 196135, Russia;
eLibrary SPIN: 8549-3254; e-mail: oo-lebedev@mail.ru