

О МЕХАНИЗМЕ СОЛЕОТЛОЖЕНИЯ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ МОРСКОЙ СРЕДЫ

Химич В.Л., Кузнецов Ю.П.

ФГБ ОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия (603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24), e-mail: tseu@nntu.nnov.ru

Описан и проанализирован механизм солеотложения в проточной части газотурбинного двигателя, определены зависимости между параметрами двигателя и протекающими в нем физическими процессами. Приводятся результаты экспериментальных исследований механизма солеотложения в проточной части газотурбинного двигателя, работающего в условиях морской среды, при различной водности, дисперсности и солесодержании потока воздуха на входе в двигатель. Проиллюстрирована модель процесса испарения морской воды в проточной части газотурбинного двигателя и разработана методика ее расчета. Рассмотрен процесс полного высокотемпературного обезвоживания частицы раствора морской воды. Показано влияние начального диаметра капель на процесс их испарения. Определены зависимости между параметрами окружающей среды и характером солеотложения. Сделаны выводы относительно факторов, влияющих на интенсивность солеотложения.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, морская среда, засоление.

ABOUT THE MECHANISM OF SALT SCALING IN THE FLOW SECTION OF A GAS TURBINE ENGINE OPERATING IN THE MARINE ENVIRONMENT

Khimich V.L., Kuznetsov Y.P.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia (603950, Nizhny Novgorod, Minin street, 24), e-mail: tseu@nntu.nnov.ru

We described and analysed the salt sedimentation mechanism in flowing part of the gas-turbine engine and defined dependences between parameters of the engine and the physical processes proceeding in it. We gave the results of experimental studies of the mechanism of salt sedimentation in flowing part of the gas-turbine engine working in the conditions of the marine environment at various water content, dispersion and salinity of a stream of air on an entrance to the engine. We illustrated the model of process of evaporation of sea water in flowing part of the gas-turbine engine and developed the technique of its calculation. We considered process of full high-temperature dehydration of a particle of solution of sea water. We showed influence of initial diameter of drops on process of their evaporation. We defined dependences between parameters of environment and nature of salt sedimentation. We made conclusions concerning the factors influencing intensity of salt sedimentation.

Keywords: gas-turbine engine, marine environment, salinity.

Исследование особенностей работы газотурбинных двигателей (ГТД) в условиях морской среды и характера солеотложения в его проточной части является важным этапом в обеспечении его надежности и требуемого ресурса.

Цель исследования

Попавшая в двигатель морская вода подвергается интенсивному тепловому воздействию со стороны газового потока и деталей газоздушного тракта в большом диапазоне температур, превышающих 2000 К. При этом происходит ряд сложных физических процессов, таких как испарение жидкости, прогрев, плавление и кристаллизация солевых частиц, от протекания которых зависит характер солеотложений по длине проточной части и изменение параметров двигателя. Целью настоящего исследования является описание и глубокий анализ механизма солеотложения в проточной части

газотурбинного двигателя, а также определение зависимостей между вышеуказанными физическими процессами и параметрами двигателя.

Материал и методы исследования

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что из всей жидкости, поступившей в осевую ступень компрессора ГТД, около 60% будет находиться в капельном виде в межлопаточном канале и около 40% в виде пленок на лопатках корпуса компрессора. При прохождении ступени на корпус компрессора осядет 7 – 10% от всей попавшей в ступень жидкости.

Кроме аэродинамического воздействия, влага при прохождении через ступень подвергается тепловому воздействию. В результате часть ее будет испаряться, а это приведет к уменьшению размера капель, толщины жидкой пленки и повышению концентрации солевого раствора.

Аналогичная картина наблюдается и на последующих ступенях до тех пор, пока интенсивность испарения влаги не будет равной интенсивности ее осаждения. Это условие соответствует кризису испарения движущейся пленки, при котором происходит ее полное высыхание. Оно характеризует начало процесса солеотложения.

Отложение солей по тракту компрессора будет неравномерным. Наибольшая интенсивность имеет место непосредственно за границей начала солеотложения. На последующих ступенях, несмотря на то, что тепловой поток, подводимый к жидкости, возрастает, интенсивность отложений снижается вследствие уменьшения водности потока по сравнению с предыдущей ступенью. В итоге наступает момент, когда все крупные капли осядут и испарятся на предыдущих ступенях и в потоке останутся либо мелкие капельки, либо частицы сухой соли. На этом участке компрессора отложение соли происходит только на носиках лопаток, так как мелкодисперсные частицы следуют по линии тока газового потока. При полном высыхании мелких капель отложения солей не происходит. Таким образом, из всего количества растворенной в воде соли, попавшей в двигатель, часть ее отложится в компрессоре в зависимости от его конструктивных особенностей и термодинамических параметров, а другая часть – в зависимости от водности потока, поступит в камеру сгорания.

Морская вода движется в проточной части в капельном виде и в виде пленок, поэтому процессы теплообмена будут иметь различие для каждого вида движения. В компрессоре можно выделить три основных вида воздействия теплового потока на жидкую фазу: испарение капель, испарение влаги с поверхности лопаток и испарение влаги с внутренней поверхности корпуса.

Морская вода является сложным многокомпонентным раствором, концентрация солей в которой при испарении будет изменяться. Процесс полного высокотемпературного обезвоживания частицы раствора подразделяется на несколько принципиально различных периодов:

- прогрев капли до температуры равновесного испарения;
- равновесное испарение капли (эти два периода практически одинаковы как при испарении капель раствора, так и капель чистого растворителя);
- период коркообразования, когда на межфазной границе образуется корочка при достижении концентрации раствора состояния насыщения у поверхности капли (с этого момента испарение идет при постоянстве диаметра частицы);
- период кипения, когда при перегреве раствор под коркой вскипает (это приводит к растрескиванию корочки и выплескиванию части жидкости в поток; однако при невысоких температурах газа периоды коркообразования и кипения могут отсутствовать);
- период сушки, при котором масса частицы асимптотически приближается к массе остатка.

Принимая во внимание относительно небольшую концентрацию солей в морской воде и то, что их отложения образуются на участке от первых до средних ступеней компрессора, где температура воздуха еще сравнительно невелика, влиянием периодов от коркообразования до сушки на испарение капель морской воды в тракте компрессора ГТД можно пренебречь (принимая, что морская вода будет испаряться также, как и пресная).

В качестве расчетной примем модель одиночной испаряющейся капли в потоке газа, поскольку в рассматриваемой задаче концентрация жидкой фазы мала (менее 1%).

Система уравнений, описывающих процесс испарения капли, состоит из двух дифференциальных уравнений первого порядка – уравнения движения и уравнения испарения, и закона движения, связывающего координату капли по оси двигателя Z со временем τ

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC_K}{dt} &= \frac{3}{4} C d \frac{\rho_\Gamma}{\rho_{\text{ж}}} \frac{(C_\Gamma - C_K)}{d} |C_\Gamma - C_K|; \\ \frac{d(d_K)}{d\tau} &= -Q(1 + 0,3 \Phi \sqrt{\text{Pr}} \sqrt{\text{Re}}); \\ dZ/d\tau &= C_K, \end{aligned} \right\}$$

где Q – коэффициент статического испарения капли в неподвижной среде при термодинамических параметрах данного сечения; $(1 + 0,3 \Phi \sqrt{\text{Pr}} \sqrt{\text{Re}})$ – коэффициент,

учитывающий влияние обдува (произведение двух величин представляет собой коэффициент динамического испарения).

На основании принятой модели процесса испарения жидкой фазы в проточной части газотурбинного двигателя была разработана соответствующая методика расчета. Установлено, что на интенсивность испарения морской воды в проточной части будут влиять атмосферные условия, водность и дисперсность потока, а также концентрация солей в воде. Атмосферное давление слабо влияет на процесс испарения, поэтому рассмотрим только влияние температуры T_n и влажности ϕ атмосферного воздуха. Для определения влияния указанных факторов по разработанной методике был выполнен расчет испарения капель в проточной части турбовинтового двигателя (ТВД), имеющего 14-ступенчатый компрессор. [1]

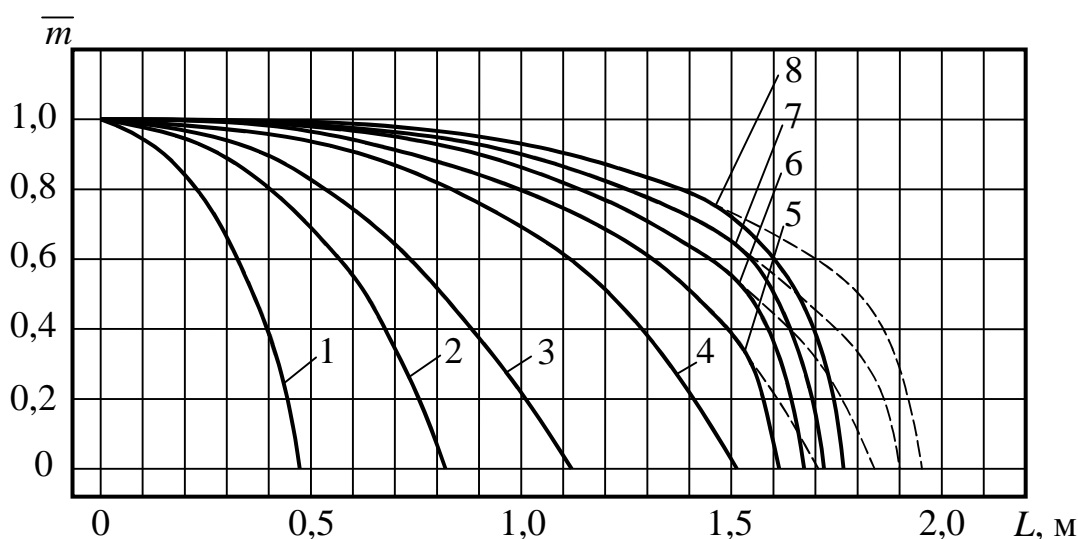


Рис. 1. Распределение параметров и испарения капель воды по тракту ТВД:

1 – $d_k = 2 \cdot 10^{-6}$ м; 2 – $d_k = 5 \cdot 10^{-6}$ м; 3 – $d_k = 10 \cdot 10^{-6}$ м; 4 – $d_k = 20 \cdot 10^{-6}$ м;

5 – $d_k = 30 \cdot 10^{-6}$ м; 6 – $d_k = 40 \cdot 10^{-6}$ м; 7 – $d_k = 50 \cdot 10^{-6}$ м; 8 – $d_k = 60 \cdot 10^{-6}$ м

Результаты расчетов приведены на рис.1 и 2 для капель диаметром от $2 \cdot 10^{-6}$ до $60 \cdot 10^{-6}$ м. По результатам расчетов можно заключить, что наиболее существенное влияние на испарение капель оказывает их начальный диаметр (дисперсность). В компрессоре полностью испаряется влага из капель диаметром не более $20 \cdot 10^{-6}$ м. Испарение оставшейся влаги происходит в камере сгорания. Температура и влажность атмосферного воздуха по сравнению с начальным диаметром капель оказывают значительно меньшее влияние на интенсивность испарения. Испарение капель практически не зависит от водности потока и концентрации солей в морской воде.

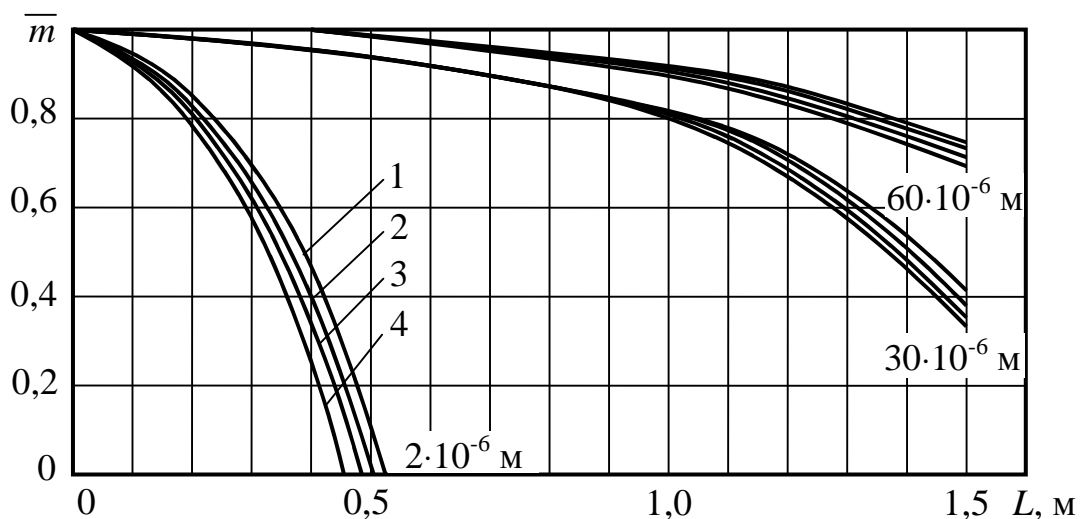


Рис. 2. Влияние температуры атмосферного воздуха на испарение капель в зависимости от их среднемассового диаметра:

$$1 - T_n = 278 \text{ К}; 2 - T_n = 288 \text{ К}; 3 - T_n = 298 \text{ К}; 4 - T_n = 308 \text{ К}$$

Вследствие того, что в камере сгорания температура газов выше температуры плавления солей, входящих в состав морской воды, то там происходит их плавление. Расплавленные частицы соли вместе с потоком газа попадают в проточную часть турбин и осаждаются на поверхности лопаток. Если температура поверхности лопаток ниже, чем температура плавления соли, то будет происходить кристаллизация и отложение солей на спинках лопаток. При более высокой температуре расплав соли течет в виде пленок и струек по поверхности лопаток и срывается в осевой зазор с выходной кромки.

Наблюдения за работой ГТД в морских условиях показывают, что интенсивность солевых отложений и их место существенно зависит от параметров двухфазного потока на входе в двигатель, и в первую очередь от водности. При малых значениях водности (до 0,1%) происходит обрастание солью канала воздухозаборника, стоек передней опоры, а в компрессоре отложение солей начинается с первых ступеней. С увеличением водности зона начала солевых отложений смещается внутрь воздухозаборного канала и при водности 0,15% в воздухозаборнике и на первых ступенях компрессора солевые отложения практически отсутствуют (рис. 3). При водности 0,5% солевые отложения смещаются вглубь компрессора, приобретая максимальные значения на 5-6-й ступени. Далее солевые отложения уменьшаются и на последних ступенях компрессора, как правило, отсутствуют. В турбине же наиболее интенсивно процесс отложения солей происходит на сопловом аппарате и рабочем колесе первой ступени [5].

Таким образом, зона начала выпадения солей в тракте компрессора и зона ее максимальной интенсивности смещается вглубь компрессора при больших водностях и к входной части при меньшей. В турбине наибольшая интенсивность отложения солей

приходится на первую ступень независимо от начальной водности потока на входе в компрессор. [2]

Исходя из изложенных представлений о процессах солеотложения в проточной части ГТД, можно заключить, что интенсивность и зона отложения солей определяется движением и распределением по газоздушному тракту двигателя содержащейся в потоке газа жидкой фазы и воздействием на нее теплового потока от несущей среды и деталей двигателя.

Картина солеотложения в проточной части ГТД при различных значениях водности потока аналогична рассмотренной и отличается лишь тем, что зона начала выпадения солей в тракте компрессора и зона максимальной интенсивности смещается вглубь компрессора при большой водности и к выходной части при меньшей.

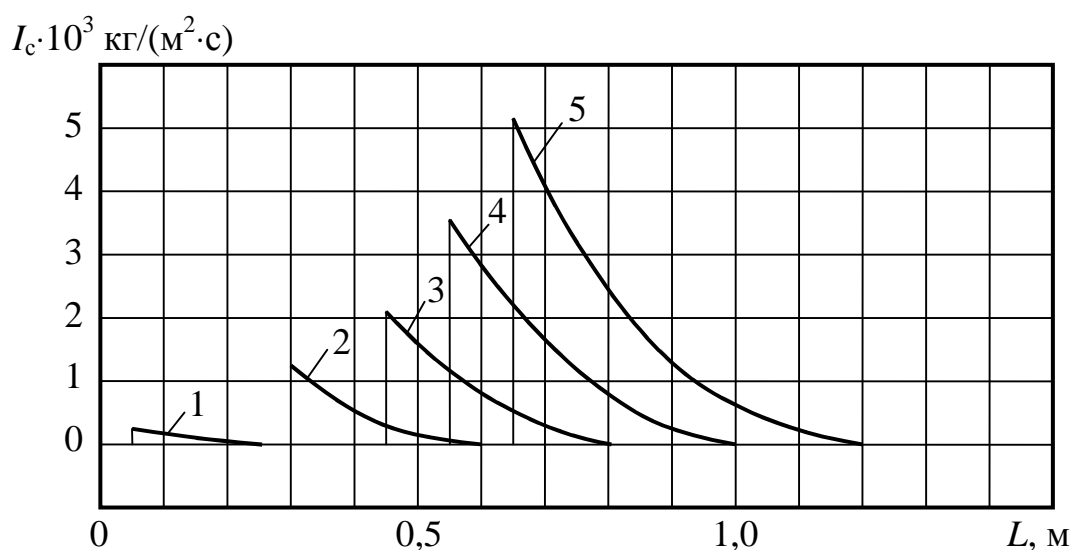


Рис. 3. Влияние водности потока на интенсивность отложения соли по тракту 14-ступенчатого компрессора при влажности воздуха $\phi = 60\%$, температуре воздуха $T_n = 288$ К, солёности морской воды $S = 3,5\%$ для водности μ :

$I - 0,01\%$; $2 - 0,1\%$; $3 - 0,3\%$; $4 - 0,5\%$; $5 - 1,0\%$

В процессе наблюдений за состоянием проточной части различных двигателей замечено, что на характер солеотложения влияют также солесодержание морской воды, температура и влажность атмосферного воздуха, а также режим работы двигателей. От значения этих величин зависит расположение границы начала выпадения солей в компрессоре. Увеличение температуры атмосферного воздуха способствует к некоторому смещению границы испарения капель к входу в компрессор, а повышение его влажности – вглубь компрессора [3].

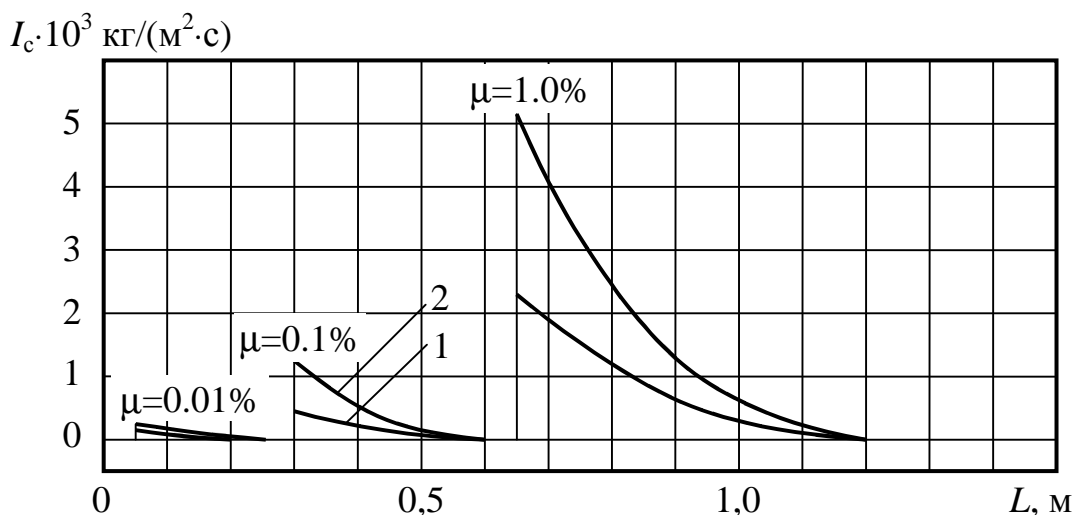


Рис. 4. Влияние солёности морской воды на интенсивность отложения соли по тракту компрессора при $\phi = 60\%$ и $T_n = 288$ К: 1 – $S = 1,5\%$; 2 – $S = 3,5\%$

Однако наиболее существенное влияние на испарение капель оказывает их начальный диаметр. Чем больше диаметр капле, тем глубже по тракту компрессора начинается граница их испарения и солеотложения. Как уже указывалось, в компрессоре полностью испаряется влага из капле диаметром не более $20 \cdot 10^{-6}$ м. Температура и влажность атмосферного воздуха оказывают значительно меньшее влияние на интенсивность испарения капле и солеотложение, чем диаметр капле.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

- наиболее существенное влияние на интенсивность отложения солей и характер ее распределения по тракту компрессора оказывает водность потока;
- при одинаковых значениях водности солёность морской воды не оказывает влияния на границы зоны солевых отложений, а интенсивность отложения солей при этом пропорциональна солёности морской воды;
- температура и влажность атмосферного воздуха оказывают незначительное влияние на интенсивность солеотложения.

Заключение

Исследования показывают, что при начальной концентрации соли в воде 17% и температуре нагревающего воздуха 162 °С время испарения жидкости из частицы раствора примерно на 20% больше, чем время испарения чистого растворителя. Максимальная же концентрация солей в морской воде значительно ниже (3,5 – 3,8%), поэтому период равновесного испарения для нее будет близок к времени испарения пресной воды [4].

Список литературы

1. Кузнецов Ю.П. Создание неавтономных турбоприводов на базе синтеза высокоэффективных микротурбин различных кинематических схем : дис.... док. тех. наук. – СПб. 1995. – С. 21-29.
2. Кузнецов Ю.П., Чуваков А.Б. Экспериментальная установка для исследования малоразмерных турбинных ступеней. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – С. 54.
3. Химич В.Л., Барышников В.И., Чернигин Ю.П. Расчёт характеристик газотурбинных двигателей в условиях загрязненного воздуха методом малых отклонений. // Учебное пособие для студентов высших учебных заведений – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. техн. ун-та, 2008. – 71 с.
4. Химич В.Л., Чернигин Ю.П. Проектирование силовых установок высокоскоростных судов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2006. – С. 22-34
5. Химич В.Л., Чернигин Ю.П. Проектирование силовых установок экранопланов // Учебник для курсантов Военно-морского инженерного института и студентов высших учебных заведений – СПб.: Судостроение, 2011. – 428 с.

Рецензенты:

Зуев В.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Кораблестроение и авиационная техника» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород;

Ваганов А.Б., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Аэро- гидродинамика, прочность машин и сопротивление материалов» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.