

Исследование режимов плавки для удаления гололедных образований на грозозащитных тросах с оптоволоконным кабелем

© К.С. Егоров, С.И. Каськов

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, 105005, Россия

Разработаны физическая и математическая модели плавки гололедных образований на грозозащитных тросах посредством теплоты, выделяемой при прохождении электрического тока. Исследован тепловой режим грозозащитного троса с оптоволоконным кабелем, получена аналитическая формула для расчета температуры троса с определением времени процесса удаления гололедных образований.

Ключевые слова: гололед, грозозащитный трос, оптоволоконный кабель, плавка гололеда.

Введение. Одной из проблем при эксплуатации линий электропередачи (ЛЭП) является образование гололеда различного вида на проводах и опорах. В Российской Федерации существуют районы, где климатические условия способствуют регулярному возникновению гололедных образований. Однако единичные случаи обледенения возможны и в районах, для которых данные явления нехарактерны. Например, 25–26 декабря 2010 г. в Московском регионе прошел «ледяной» дождь, который привел к падению более 50 000 деревьев, аварийному отключению от энергоснабжения тысяч жителей.

Для защиты ЛЭП от повреждения атмосферными электрическими явлениями на самой высокой точке линии устанавливают грозозащитный трос. В настоящее время ведущими операторами телефонной и сотовой связи (ОАО «Ростелеком», ОАО «Мегафон» и т. д.) для высокоскоростной передачи данных используется сеть ЛЭП, для чего в грозозащитном тросе одну из металлических нитей заменяют оптоволоконным кабелем. В связи с этим удаление гололедных образований на грозозащитном тросе представляется важной и актуальной задачей.

Одним из вариантов борьбы с гололедными образованиями является их нагрев посредством пропускания через них постоянного или переменного электрического тока. При этом происходит плавка гололеда. Дополнительная сложность при плавке гололеда на грозозащитном тросе с оптоволоконным кабелем (ОКГТ) заключается в ограничении температуры на уровне 80 °С. Превышение температу-

ры недопустимо, так как это может привести к выходу ОКГТ из строя.

В представленной работе выполнены теоретические исследования теплового режима ОКГТ, выведена аналитическая формула для выбора режимов плавки и определения времени процесса удаления гололедных образований.

Постановка задачи. Вывод и обоснование достаточно простой математической зависимости, пригодной для инженерных расчетов, представляют в данном случае сложную и нетривиальную задачу, так как необходимо учитывать несколько факторов: несимметричность задачи, неопределенность граничных условий, нестационарность процесса и т. п.

При этом важно отметить, что гарантировать достаточную точность расчета сложно в связи с наличием многих неопределенных факторов: неточность в оценке толщины гололедных образований, сила и направление ветра и т. д. Это ставит под сомнение целесообразность использования очень популярных сегодня и достаточно точных численных методов с применением пакетов инженерного анализа ANSYS.

Цель данной работы — вывод соотношения, подходящего для инженерных расчетов по выбору режимов плавки и определению времени процесса удаления гололедных образований.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить возможность плавки гололеда в зависимости от температурных условий и толщины льда;
- оценить время нагрева ОКГТ до предельной температуры и выхода на стационарный режим;
- вычислить значения токов и времени плавки в зависимости от температурных условий, толщины и вида гололедных образований в приближении стационарного процесса на основе балансового соотношения энергии.

Физическая модель процесса. Различные образования гололедных и изморозевых образований на ОКГТ представлены на рис. 1 [1]. Для построения физической модели рассмотрим случай образования муфты из льда высокой плотности.

Как правило, соединение провода с ледяной муфтой плотное, поэтому в начальный момент времени систему ОКГТ—гололед можно рассматривать как два полуограниченных тела с возникающей в последующий момент температурой контакта t_k на границе раздела. В момент времени $\tau = 0$ температура ОКГТ $t_{\text{ОКГТ}}$ и температура ледяной муфты t_m одинаковы и равны температуре окружающего воздуха t_v (рис. 2). В следующий момент времени при включении системы в

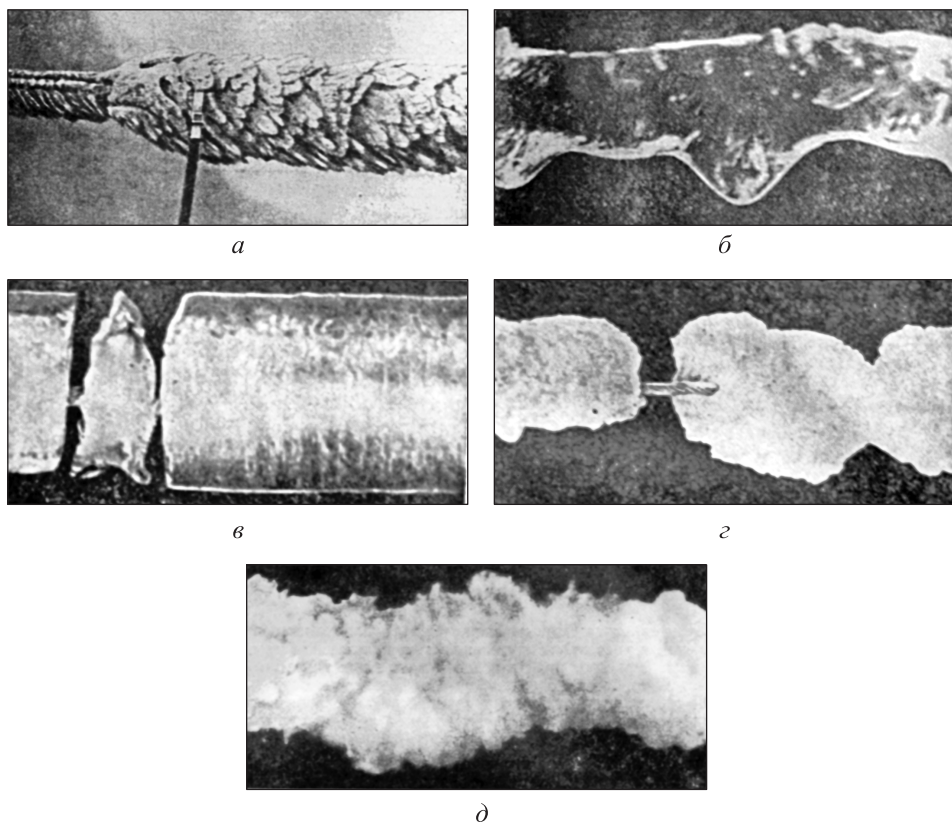


Рис. 1. Виды гололедных образований:

a — зернистая изморозь; *б* — гололед прозрачный; *в* — гололед матовый; *г* — гололед белый; *д* — мокрый снег

электрическую сеть начинается нагрев ОКГТ, что соответственно приводит к повышению температуры как ОКГТ, так и ледяной муфты. Радиальным перепадом температуры по сечению ОКГТ можно пренебречь, не внося при этом существенной погрешности. При достижении значения $t_k = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ начинается процесс плавки ледяной муфты (рис. 3).

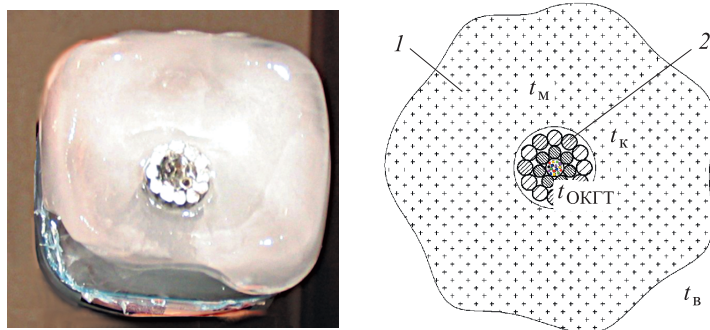


Рис. 2. Исходное состояние системы ОКГТ—гололед:

1 — ледяная муфта; *2* — ОКГТ

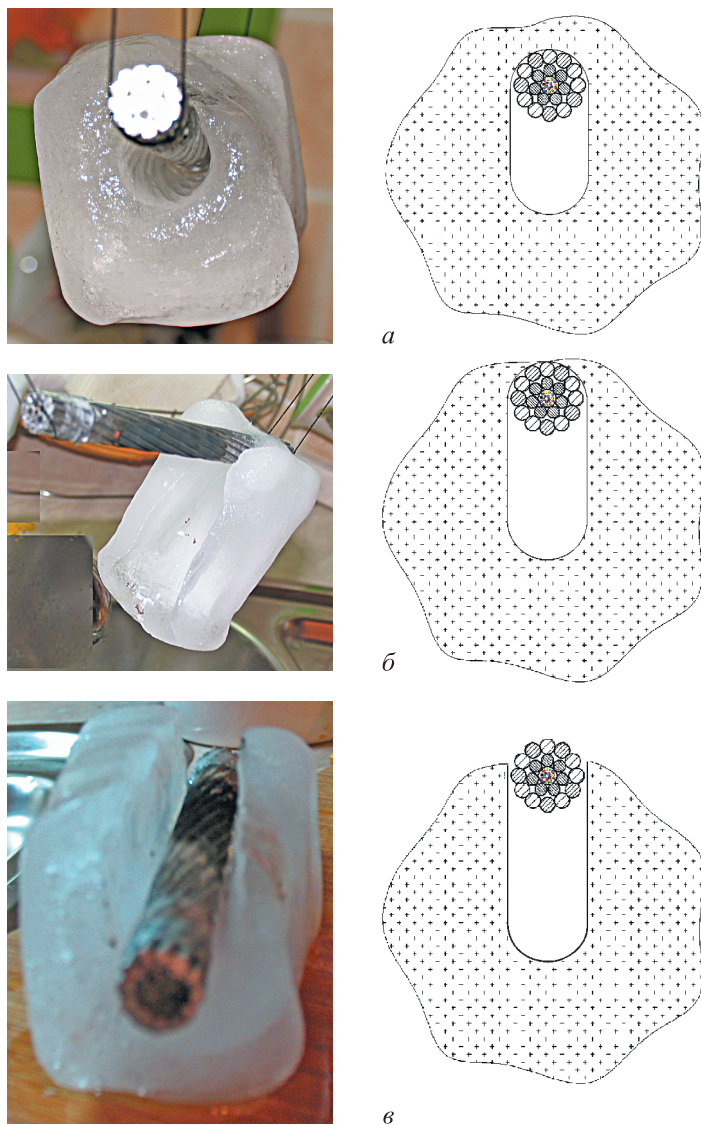


Рис. 3. Этапы плавки ледяной муфты:
a — начало процесса; *б, в* — предпоследний и последний этапы

Температура контакта зависит от величин $(\lambda\rho C_p)^{0,5}$ для материала ОКГТ и ледяной муфты (λ , ρ , C_p — теплопроводность, Вт/(м·К), плотность, кг/м³, и теплоемкость, Дж/(кг·К)). При достижении ОКГТ температуры, на несколько десятых долей градуса превышающей 0 °С, начинается процесс плавки. Вокруг ОКГТ по всему периметру оплавляется некоторое количество льда и начинает проплавляться канавка (рис. 3, *a*). В расчетах ширину канавки принимают на 10 % [2] больше диаметра провода. Одновременно происходит и дальнейший нагрев муфты. На предпоследнем этапе провод практически полностью проплавляет канавку (рис. 3, *б*), и можно ожидать падения

ледяной муфты [2]. Однако для надежности будем считать процесс завершенным только тогда, когда полностью проплавится канавка (рис. 3, в).

Математическая модель процесса. Прежде чем построить математическую модель процесса, рассмотрим возможные допущения при получении математического выражения. Как было указано, в начальный момент времени температура провода и ледяной муфты равна температуре окружающего воздуха. При включении электрического тока в течение некоторого промежутка времени будет происходить нагрев ОКГТ и ледяной муфты (при этом до прогрева муфты теплообмен с окружающей средой осуществляться не будет, так как температура внешней стенки муфты равна температуре воздуха). До выхода системы на стационарный режим по ледяной муфте от ее внутренней стенки к внешней идет тепловая волна. После того, как температура внутренней стенки муфты достигнет значения $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, задача переходит в стационарное состояние, поскольку есть постоянная температура внутренней стенки муфты, постоянный конвективный отвод теплоты, отвод теплоты излучением и расходование теплоты на плавку льда. Впервые решение этой задачи было рассмотрено В.В. Бургсдорфом [3]. Основное допущение при выводе полученного указанным автором соотношения — исключение времени из решения, что позволило упростить задачу. Это означает, что при составлении баланса теплоты не учитывается время нагрева ледяной муфты ввиду малости потерь теплоты в окружающую среду конвекцией и излучением за это время. Однако корректность этого допущения не была обоснована и также не учтена теплота, расходуемая на нагрев ОКГТ, который может привести к потере работоспособности грозозащитного троса.

Оценим предварительно время нагрева ледяной муфты, так как формула для расчета времени плавки выводится в предположении, что вся ледяная муфта нагревается до температуры, распределенной по логарифмическому закону стационарного решения (при этом предполагается, что температура внутренней стенки муфты $0\text{ }^{\circ}\text{C}$). В работе [3] рассматривается полный нагрев ледяной муфты. При этом допущение, основанное на соблюдении теплового баланса, является некорректным. Тепловой баланс будет выполняться всегда, даже если ледяная муфта прогреется не полностью; в этом случае формула для расчета будет иной.

Определение времени нагрева ледяной муфты сводится к решению задачи нагрева неограниченного массива.

Рассмотрим уравнение теплопроводности для бесконечного цилиндра [4]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + a \frac{\partial^2 t}{\partial r^2}, \quad (1)$$

где t — температура, °С; τ — время, с; a — температуропроводность материала цилиндра, м²/с; r — радиус цилиндра, м.

Введем уровень отсчета температуры от t_{∞} , т. е. новую температуру $\theta = t(r, \tau) - t_{\infty}$. Тогда получим:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + a \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2}.$$

Начальное условие нагрева неограниченного массива: $\theta(r, \tau = 0) = t(r, \tau) - t_{\infty} = 0$. На поверхности $r = r_0$ ставится граничное условие 1-го рода: $\theta(r = r_0, \tau) = t_0 - t_{\infty} = \theta_0$. На удалении от поверхности избыточная температура остается нулевой: $\theta(r \rightarrow \infty, \tau) = t(r, \tau) - t_{\infty} = 0$.

Согласно теории подобия и размерностей, введем некоторые характерные значения параметров. Из уравнения (1)

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + a \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} \rightarrow \frac{\theta_0}{\tau} \approx a \frac{\theta_0}{r_0 \delta(\tau)} + a \frac{\theta_0}{\delta(\tau)^2}, \quad (2)$$

где r_0 — внутренний радиус цилиндра.

Таким образом, толщина прогрева

$$\delta(\tau) \approx \frac{a\tau}{r_0}.$$

Для оценки толщины прогрева зададим следующие исходные данные:

- внутренний радиус ледяной муфты $r_0 = 0,005$ м;
- температуропроводность льда $a = 1,08 \cdot 10^{-6}$ м²/с;
- характерное время плавки $\tau = 3\ 600$ с.

В результате ледяная муфта прогреется на толщину $\delta(\tau) \approx 0,78$ м. Очевидно, что это значение существенно превышает реальные размеры ледяной муфты. Следовательно, характерное время нагрева муфты — достаточно малая величина. Отметим, что это время практически не зависит от внешних условий, а определяется только теплофизическими свойствами льда или изморози.

Точное решение квадратного уравнения (2) относительно $\delta(\tau)$ дает формулу

$$\delta(\tau) \approx 0,5 \left[\frac{a}{r_0} + \sqrt{\left(\frac{a}{r_0} \right)^2 + \frac{4a}{\tau}} \right] \tau. \quad (3)$$

Как видно из формулы (3), толщина нагрева будет еще больше. Таким образом, в математической модели принимается, что время нагрева ледяной муфты равно нулю, т. е. его можно не учитывать. Мощность, выделяемая вследствие прохождения электрического тока, расходуется на нагрев ОКГТ, плавку и нагрев ледяной муфты, а также на компенсацию потерь теплоты за счет излучения и конвекцией с поверхности льда.

Необходимо отметить следующее: в случае изморози время нагрева может быть значительным, так как ее теплопроводность очень мала — 0,05...0,2 Вт/(м·°С). Однако при этом погрешность расчета практически не увеличивается, поскольку потери теплоты за счет конвекции и излучения малы по сравнению с теплотой, расходуемой на плавку льда и нагрев ОКГТ.

Вывод аналитической формулы. Тепловой баланс (рис. 4) определяется следующим уравнением (рассматривается количество теплоты на 1 м ОКГТ):

$$Q_{эл} + Q_{сол} = Q_{пр} + Q_{л} + Q_{пл} + Q_{в} + Q_{из},$$

где $Q_{эл}$ — теплота, выделяемая вследствие прохождения электрического тока по ОКГТ (подводимая теплота), Дж/м; $Q_{сол}$ — теплота, подводимая за счет солнечного излучения, Дж/м; $Q_{пр}$ — теплота, затрачиваемая на нагрев провода, Дж/м; $Q_{л}$ — теплота, затрачиваемая на нагрев льда, Дж/м; $Q_{пл}$ — теплота, затрачиваемая на плавку льда, Дж/м; $Q_{в}$ — теплота, отводимая за счет конвекции в воздухе, Дж/м; $Q_{из}$ — теплота, отводимая за счет излучения, Дж/м.

При этом

$$Q_{эл} = I^2 R_{эл} \Delta\tau,$$

где I — ток плавки, А; $R_{эл}$ — удельное электрическое сопротивление ОКГТ, Ом/м; $\Delta\tau$ — время плавки, с.

Теплота, подводимая за счет солнечного излучения, принимается равной нулю.

Теплота, затрачиваемая на нагрев,

$$Q_{ОКГТ} = (t_{ОКГТ} - t_{в}) \sum_{i=1}^n C_i \rho_i S_i,$$

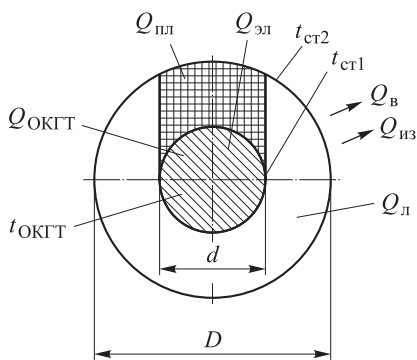


Рис. 4. Схема к выводу аналитической формулы

где C_i — теплоемкость компонента материала ОКГТ, Дж/(кг·°C); ρ_i — плотность компонента материала ОКГТ, кг/м³; S_i — площадь поперечного сечения одного из компонентов ОКГТ, м².

Теплота, затрачиваемая на нагрев льда,

$$Q_{\text{л}} = \frac{\pi}{2} \rho_{\text{л}} C_{\text{л}} \left[t_{\text{ст}2} \left(\frac{D^2}{2} - \frac{D^2}{4 \ln \frac{D}{d}} + \frac{d^2}{4 \ln \frac{D}{d}} \right) + t_{\text{в}} \left(\frac{d^2}{2} - \frac{D^2}{2} \right) \right],$$

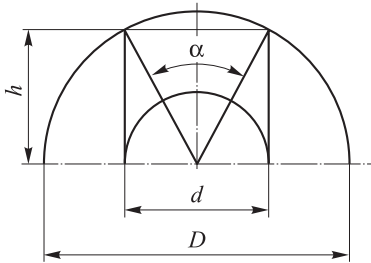
где $C_{\text{л}}$ — теплоемкость льда, Дж/(кг · °C).

Теплота, затрачиваемая на плавку льда,

$$Q_{\text{пл}} = 1,1 F r_{\text{пл}} \rho_{\text{л}},$$

где F — площадь проплавляемой канавки, м²; $r_{\text{пл}}$ — удельная теплота плавления льда, Дж/кг; $\rho_{\text{л}}$ — плотность льда, кг/м³.

Площадь проплавляемой канавки (рис. 5):



$$F = \frac{hd}{2} - \frac{\pi d^2}{8} + \frac{\pi D^2}{4} \frac{\alpha}{360};$$

где d — диаметр ОКГТ, м; D — диаметр ледяной муфты, м;

Рис. 5. Схема к расчету площади проплавляемой канавки

$$h = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2};$$

$$\alpha = 2 \arctg \frac{d}{2h}.$$

Теплота, отводимая за счет конвекции в воздухе,

$$Q_{\text{в}} = \frac{\pi(t_{\text{ст}1} - t_{\text{в}}) \Delta \tau}{\frac{1}{\alpha_{\text{в}} D} + \frac{1}{2\lambda_{\text{л}}} \ln \frac{D}{d}},$$

где $\alpha_{\text{в}}$ — коэффициент теплоотдачи от поверхности льда к воздуху, Вт/(м² · °C); $\lambda_{\text{л}}$ — теплопроводность льда, Вт/(м · °C); $t_{\text{ст}1}$ — температура внутренней стенки ледяной муфты, °C.

Теплота, отводимая за счет излучения (см. рис. 4),

$$Q_{\text{из}} = \pi D \varepsilon \sigma (t_{\text{ст}2}^4 - t_{\text{в}}^4) \Delta \tau,$$

где ε — коэффициент черноты поверхности льда; σ — постоянная Стефана — Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·(°C)⁴); t_{cr2} — температура внешней стенки ледяной муфты, °C.

Соответственно из уравнения (1) можно рассчитать необходимый ток плавки или время плавки.

При выводе аналитической формулы не учтена теплота, которая расходуется на нагрев ледяной муфты в проплавленной канавке до температуры плавления (0 °C). Это позволяет уменьшить погрешность расчета из-за несимметричности задачи при проплавлении канавки [3].

Рассмотрим пример использования полученной формулы с исходными данными, приведенными в работе [3]: провод марки АС-95/16 (в работе указан провод СА-50 — это старая маркировка); диаметр изморозевой муфты $D = 0,2$ м; плотность изморози $\rho = 150$ кг/м³; ток плавки $I = 350$ А; температура воздуха $t_b = -7$ °C. Время плавки по эксперименту из работы [3] составило 46 мин. Вычисленное по предложенной формуле необходимое время плавки составляет 49 мин.

Заключение. Получена и обоснована формула для расчета тока и времени плавки гололедных образований на ОКГТ. Выполнена проверка этой формулы с экспериментальными данными. Полученное соотношение вошло в документ [5].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бургсдорф В.В., Муретов Н.С. *Расчетные климатические условия для высоковольтных линий электропередачи. Труды ВНИИЭ.* Москва, Госэнергоиздат, 1960, вып. 10, т. 1, 208 с.
- [2] Бургсдорф В.В. *Сооружение и эксплуатация линий электропередачи в сильно гололедных районах.* Москва, Госэнергоиздат, 1947, 196 с.
- [3] Бургсдорф В.В. Расчет тока и времени плавления гололеда на линиях электропередачи. *Электричество*, 1946, № 2, с. 69–72.
- [4] Полянин А.Д., Вязьмин А.В., Журов А.И., Казенин Д.А. *Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса.* Москва, Факториал, 1998, 368 с.
- [5] *СТО 56947007-29.060.50.122–2012. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Руководство по расчету режимов плавки гололеда на грозозащитном тросе со встроенным оптическим кабелем (ОКГТ) и применению распределенного контроля температуры ОКГТ в режиме плавки.* Москва, 2012.

Статья поступила в редакцию 21.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Егоров К.С., Каськов С.И. Исследование режимов плавки для удаления гололедных образований на грозозащитных тросах с оптоволоконным кабелем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 5.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/crigen/725.html>

Егоров Кирилл Сергеевич родился в 1977 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2001 г. Доцент кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных публикаций в области высококомпактных поверхностей теплообмена, теплообмена в сверхзвуковых потоках. e-mail: egorovks@power.bmstu.ru

Каськов Сергей Иосифович родился в 1964 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1987 г. Научный сотрудник НИИ «Энергетического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 11 научных публикаций в области интенсификации теплоотдачи, исследований эффективности теплообменных аппаратов и энергетических установок. e-mail: kaskov@power.bmstu.ru