

DOI 10.32820/2079-1747-2020-25-152-158  
УДК 621.165

## **К ВОПРОСУ ВЫБОРА ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТИ СОПЛОВЫХ И РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН**

©Фурсова Т.Н.

*Українська інженерно-педагогічна академія*

**Інформація про автора**

**Фурсова Тетяна Миколаївна:** ORCID 0000-0003-1900-7432; [tatiana2507@ukr.net](mailto:tatiana2507@ukr.net); кандидат технічних наук; доцент кафедри теплоенергетики та енергозберігаючих технологій; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків 61007, Україна

В работе рассматривается выбор чистоты поверхности сопловых и рабочих лопаток паровых турбин. Сложность этой проблемы обусловлена такими факторами, как трудоемкость, себестоимость, наличие технологического оборудования, расчетное снижение потерь в проточной части, длительность сохранения заданной чистоты поверхности во время эксплуатации турбин и др. Проведенный анализ теоретических и экспериментальных исследований свидетельствует о существенном влиянии чистоты обтекаемой поверхности лопаток на экономичность и усталостную прочность облопачивания паровых турбин, а также недостаточную сформулированность требований выбора допустимой шероховатости, которая бы позволила обеспечить максимальную эффективность работы турбоустановок. Из всех существующих нормативных документов фактически лишь один определяет требования к чистоте поверхности активной части лопаток, при этом в нем недостаточно полно учтен диапазон применяемых отечественных хорд лопаток, а также имеет место при выпуске чертежей несоблюдение требований методических указаний в части выбора допустимой шероховатости. Сделан вывод о необходимости создания методики расчета для повышения экономичности проточных частей паровых турбин на основе исследования чистоты поверхности профильной части сопловых и рабочих лопаток, а также создание соответствующей нормативной документации. Повышение чистоты поверхности сопловых и рабочих лопаток способствует снижению интенсивности заноса проточной части солями в период эксплуатации турбоагрегата, что обеспечит повышение его эксплуатационной надежности и экономичности работы. Транспортировка готовых рабочих и сопловых лопаток, а также процесс облопачивания роторов и изготовление диафрагм должны исключать механическое воздействие на их профильные поверхности. Результаты работы могут быть использованы в области энергомашиностроения, при проектировании и эксплуатации паровых турбин.

**Ключевые слова:** чистота поверхности, шероховатость, сопловая и рабочая лопатки, экономичность, надежность, турбина.

**Фурсова Т.М.** «До питання вибору чистоти поверхні соплових і робочих лопаток парових турбін».

В роботі розглядається вибір чистоти поверхні соплових і робочих лопаток парових турбін. Складність цієї проблеми обумовлена такими факторами, як трудомісткість, собівартість, наявність технологічного обладнання, розрахункове зниження втрат у проточній частині, тривалість збереження заданої чистоти поверхні під час експлуатації турбін та ін. Проведений аналіз теоретичних і експериментальних досліджень свідчить про суттєвий вплив чистоти обтічної поверхні лопаток на економічність і утомну міцність облопачування парових турбін, а також недостатню сформульованість вимог щодо вибору допустимої шорсткості, яка б дозволила забезпечити максимальну ефективність роботи турбоустановок.

З усіх існуючих нормативних документів фактично лише один визначає вимоги до чистоти поверхні активної частини лопаток, при цьому в ньому недостатньо повно врахований діапазон застосовуваних вітчизняних хорд лопаток, а також має місце при випуску креслень недотримання вимог методичних вказівок при виборі допустимої шорсткості. Зроблено висновок про необхідність створення методики розрахунку для підвищення економічності проточних частин парових турбін на основі дослідження чистоти поверхні профільної частини соплових і робочих лопаток, а також створення відповідної нормативної документації. Підвищення чистоти поверхні соплових і робочих лопаток сприяє зниженню інтенсивності занесення проточної частини солями в період експлуатації турбоагрегату, що забезпечить підвищення його експлуатаційної надійності і економічності роботи. Транспортування готових робочих і соплових лопаток, а також процес облопачування роторів і виготовлення діафрагм повинні виключати механічний вплив на їх профільні поверхні. Результати роботи можуть бути використані в області енергомашинобудування, при проектуванні і експлуатації парових турбін.

**Ключові слова:** чистота поверхні, шорсткість, соплова і робоча лопатки, економічність, надійність, турбіна.

**Fursova T.** «To the issue of choosing surface roughness for the nozzle and rotor blades of steam turbines».

The paper considers the choice of surface roughness for nozzle and rotor blades of steam turbines. The complexity of this problem results from factors such as labour content, manufacturing cost, availability of technological equipment, the estimated reduction in losses in the flow part, the duration of preservation of the surface roughness during operation of turbines, etc. The analysis of theoretical and experimental studies indicates a significant effect of the streamlined surface blades roughness on profitability and fatigue strength of steam turbine blading, as well as insufficiently formulated requirements of acceptable roughness that would ensure maximum efficiency of turbines. Of all the existing regulatory documents, in fact, only one determines the requirements to surface roughness of the blades active part, while it does not sufficiently take into account the range of Ukrainian blades chord used, as well as non-compliance with the requirements of the methodological guidelines regarding the selection of acceptable roughness takes place. It is concluded that it is necessary to create a calculation methodology to increase the efficiency of flowing parts of steam turbines based on the study of the surface roughness for the nozzle and rotor blade profile, as well as the creation of relevant regulatory documentation. Increasing the surface roughness of nozzle and rotor blades makes it possible to reduce the intensity of the salts drift of the flowing part during the operation of the turbine unit that will improve its operational reliability and cost-effectiveness. Transportation of rotor and nozzle blades, as well as the process of blading the rotors and the manufacture of diaphragms should exclude mechanical impact on their profile surfaces. The results of the work can be used in the field of power engineering, in the design and operation of steam turbines.

**Keywords:** surface roughness, roughness, nozzle and rotor blades, efficiency, reliability, turbine.

### **Актуальность**

Проблема выбора чистоты поверхности профильной части сопловых и рабочих лопаток паровых турбин является одной из сложных задач, которые приходится решать при создании новых и модернизации ранее выпущенных турбоагрегатов.

Повышение чистоты поверхности лопаток, приводит к увеличению себестоимости их производства. Недостаточные требования, обуславливающие повышенную шероховатость поверхности, могут оказать отрицательное влияние на эффективность работы проточной части турбомашин, а также на предел усталости лопаток и, следовательно, на их надежность. Кроме того, низкий класс чистоты затрудняет выполнение работ по контролю изготовленных лопаток на отсутствие дефектов в материале, а также затрудняет контроль их состояния в эксплуатации.

**Целью работы** является анализ существующих нормативных и литературных источников, посвященных влиянию шероховатости на эффективность работы паровых турбин, а также рассмотрение требований к выбору приемлемой чистоты поверхности лопаток.

#### **Анализ нормативной документации и литературных источников.**

Нормативными документами, определяющими требования к чистоте поверхности активной части лопаток, являются методические указания РД24.260.09-87 - РД24.260.12-87 [1]. Следует отметить, что в [1] недостаточно полно учтен диапазон, применяемых отечественным производителем АО «Турбоатом» хорд лопаток, а также имеет место при выпуске чертежей несоблюдение требований методических указаний в части выбора допустимой шероховатости, особенно, для лопаток цилиндра высокого давления (ЦВД).

Одним из литературных источников, наиболее подробно освещающих вопросы выбора допустимой величины шероховатости, является работа Г. Шлихтинга [2]. Автор определяет предельную высоту элементов шероховатости, которая при обтекании поверхности не вызывает дополнительного сопротивления по сравнению с гладкой поверхностью:

$$K_{\text{доп}} \leq b \frac{100}{Re} \quad (1)$$

где  $K_{\text{доп}}$  – допустимая высота шероховатости, мм;  $b$  – хорда профиля, мм;  $Re = \frac{w \cdot b}{\nu}$  – число Рейнольдса (где  $w$  – скорость потока, м/с;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с).

Разрабатывая методику использования экспериментальных данных для тепловых расчетов паровых турбин, В. Траупель в работе [3] предлагает при определении профильных потерь учитывать влияние шероховатости и числа  $Re$  в виде коэффициента

$$\zeta_{\text{про}} = \zeta_{\text{про,г}} \cdot \chi_{Re} \cdot \chi_M \cdot \chi_{\delta} + \zeta_{\text{сн}} + \zeta_{\text{пер}}, \quad (2)$$

где  $\zeta_{\text{про,г}}$  – исходная величина профильных потерь;

$\chi_{Re}$  – поправочный коэффициент, характеризующий влияние числа Рейнольдса и шероховатости;

$\chi_M$  – коэффициент, учитывающий влияние числа Маха;

$\chi_{\delta}$  – коэффициент, учитывающий толщину выходной кромки;

$\zeta_{\text{сн}}$  – потери перемешивания вследствие конечной толщины выходной кромки или отрыва потока;

$\zeta_{\text{пер}}$  – потери от вверности.

При определении коэффициента  $\chi_{Re}$  (рис. 1) использовались данные, представленные в [2]. Влияние турбулентности учитывается коэффициентами турбулентности  $KT = 1$  и  $KT = 2,5$ , которые определяются как отношение чисел  $Re$  при обтекании шара в режиме, свободном от турбулентности, и рассматриваемом течении, когда коэффициент сопротивления в обоих случаях равен  $C_{ш} = 0,3$ .

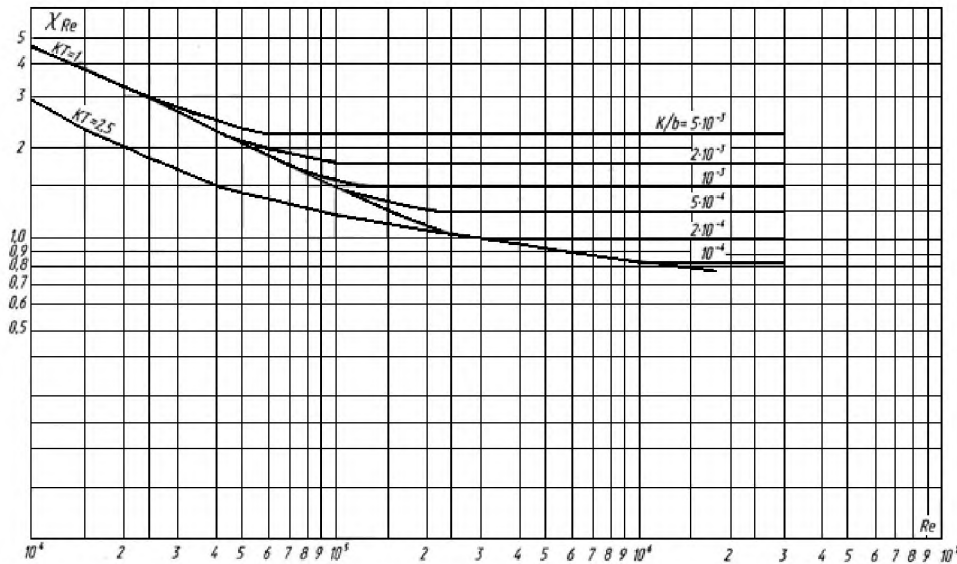


Рис. 1. Влияние числа Рейнольдса на коэффициент, характеризующий изменение экономичности  $\chi_{Re}$  в зависимости от относительной шероховатости  $k/b$  (по В. Траупелю)

Для многоступенчатых турбин с повышенной турбулентностью расчет производится по  $KT = 2,5$ . Кривые  $k/b$  (где  $k$  - высота бугорков шероховатости, а  $b$  - хорда профиля), определяющие влияние шероховатости, продлеваются до кривой  $KT = 2,5$ .

В соответствии с [4] поправка  $\chi_{Re}$  для аэродинамически гладких лопаток устанавливается кривой  $KT = 1$  (рис. 1). Однако, данная методика не позволяет оценить влияние шероховатости на экономичность турбинной ступени с большими числами Рейнольдса ( $Re > 10^6$ ), соответствующим ЦВД и некоторым ступеням цилиндра среднего давления (ЦСД).

Изучая характер обтекания турбинных профилей в работе [5] Н.М. Марков приходит к выводу, что на практике целесообразно ориентироваться на величину допустимой шероховатости, определенной при условии турбулентного характера течения в пограничном слое. Требования к чистоте поверхности на тех ее участках, на которых течение, безусловно, является ламинарным, могут быть приняты пониженными.

При условии турбулентного характера течения в пограничном слое автор в [5] предлагает при определении  $K_{доп}$  использовать выражение:

$$\frac{K_{доп}}{b} = 30Re^{-0,9} \quad (3)$$

где  $K_{доп}$  - допустимая высота шероховатости, мм;  
 $b$  - хорда профиля, мм;  
 $Re$  - число Рейнольдса.

Значения относительной шероховатости  $k/b$ , вычисленные по формулам (1) и (3) для турбинных профилей с хордами 40...80 мм практически совпадают.

На рис. 2 на основании формулы (3) представлена номограмма для определения допустимой абсолютной величины шероховатости  $R_z$ .

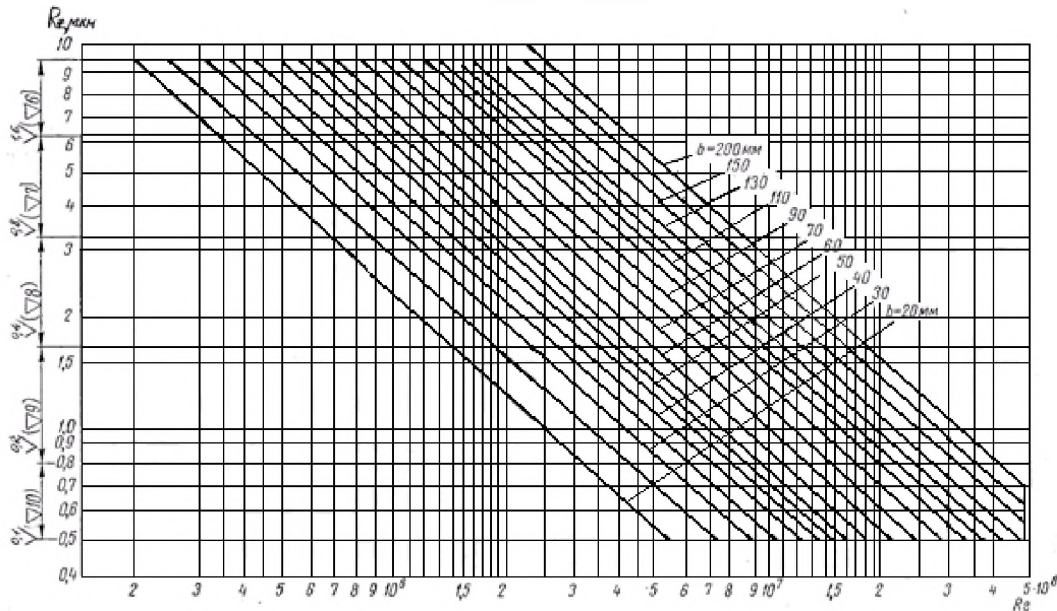


Рис. 2. Номограмма для определения необходимой чистоты поверхности  $R_z$  в зависимости от хорды профиля ( $b$ ) и числа Рейнольдса ( $Re$ )

#### 4. Требование к чистоте поверхности лопаток проточной части турбины.

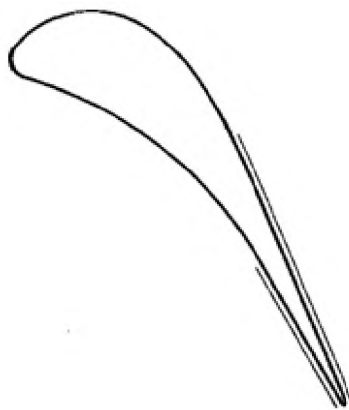
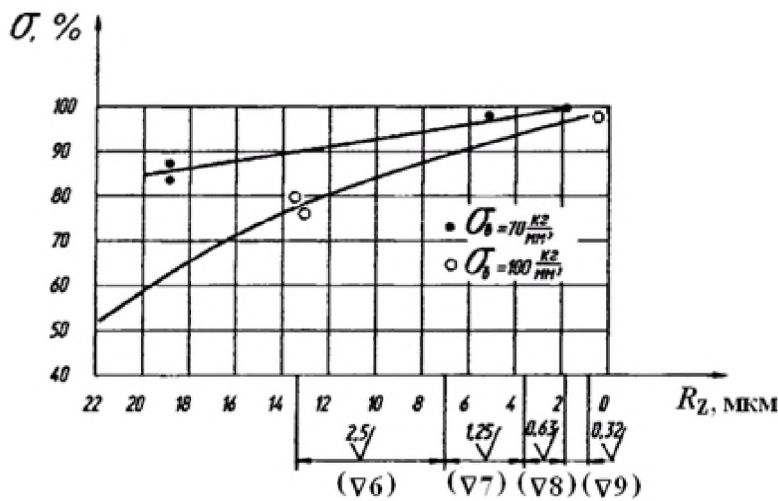


Рис.3 Расположение участков, требующих обработки по более высокому классу чистоты, чем остальную поверхность лопатки.

Автор [5] отмечает, что требования, соответствующие зависимости (3) к чистоте показанных на рис. 3 участков поверхности лопаток первых ступеней паровых турбин на сверхкритические начальные параметры пара при больших значениях числа  $Re$  (ЦВД), оказываются весьма высокими (выше 10-го класса). Обеспечить при производстве турбинных лопаток такую чистоту поверхности весьма сложно. Кроме того, стремление получить чистоту выше 10-го класса может привести к нарушению структуры верхних слоев металла при полировке. Это отрицательно сказывается на прочности лопатки. Поэтому на практике требования к чистоте поверхности в цилиндрах высокого давления не должны превышать  $0,32\sqrt{V(\Delta 9)} - 0,16\sqrt{V(\Delta 10)}$ .

В ступенях, в которых лопаточный аппарат обтекается потоком при сравнительно малых значениях числа  $Re$  (цилиндр низкого давления - ЦНД), с аэродинамической точки зрения не требуется высокой чистоты поверхности лопатки. Однако пониженные требования к чистоте поверхности этих лопаток могут оказать отрицательное влияние на их предел уста-

лости. Обследование состояния поверхности лопаток показало, что при обработке их по 7-му классу чистоты на поверхности остаются отдельные риски и царапины. При обработке лопаток по 6-му классу количество рисок и царапин резко увеличивается, при этом их глубина колеблется от 20 до 50 мкм. Риски и царапины на поверхности лопаток при 6-м и ниже классах чистоты плохо видны, что приводит к большим трудностям при их устранении. Кроме того, при чистоте поверхности лопаток, имеющей чистоту ниже 7-го класса, весьма трудно достаточно надежно осуществить контроль качества их материала. Учитывая все эти обстоятельства, автор рекомендует обработку поверхности лопаток из сталей с  $\sigma_B \leq 75 \text{ кг/мм}^2$  из условия обеспечения прочности производить не ниже 7 класса чистоты.



**Рис.4** Изменение предела выносливости лопаток изготовленных из сталей различной прочности в зависимости от чистоты поверхности

На рис. 4 [5] представлены графики изменения предела выносливости лопаток из сталей различной прочности в зависимости от чистоты поверхности. Как видно из графиков, на лопатках изготовленных из материала с  $\sigma_B = 70 \text{ кг/мм}^2$ , переход от 9-го к 7-му классу чистоты приводит к понижению предела выносливости примерно на 5%. При больших значениях  $R_z$  влияние шероховатости поверхности на предел выносливости увеличивается.

Необходимо отметить, что выбор приемлемой чистоты поверхности турбинного облопачивания должен быть сделан также с учетом влияния шероховатости на экономичность турбоустановки. Этому вопросу посвящено большое количество как экспериментальных, так и теоретических работ [2 - 9] и др.).

### Обсуждение результатов

Приведенные сведения показывают актуальность задачи выбора чистоты поверхности сопловых и рабочих лопаток паровых турбин. Анализ существующей нормативно-технической документации показал, что на сегодняшний день недостаточно полно сформулированы требования выбора допустимой шероховатости, которая бы позволила обеспечить максимальную эффективность работы турбоустановок. Для создания нормативной документации, позволяющей обеспечивать максимальную экономичность и эксплуатационную надежность проточной части паровых турбин необходимо выполнение цикла теоретических и экспериментальных научных исследований, включающих математическое моделирование физических явлений в проточной части турбины и создание методики расчета повышения экономичности проточных частей паровых турбин на основе исследований чистоты поверхности профильной части сопловых и рабочих лопаток.

### **Выводы**

Выполненный анализ теоретических и экспериментальных исследований свидетельствует о существенном влиянии чистоты обтекаемой поверхности лопаток на экономичность и усталостную прочность облопачивания паровых турбин. Повышение чистоты поверхности профильной части сопловых и рабочих лопаток повысит их усталостную прочность, а также экономичность работы турбоустановок. Повышение чистоты поверхности сопловых и рабочих лопаток способствует снижению интенсивности заноса проточной части солями в период эксплуатации турбоагрегата, что обеспечит повышение его эксплуатационной надежности и экономичности. Транспортировка готовых рабочих и сопловых лопаток, а также процесс облопачивания роторов и изготовление диафрагм должны исключать механическое воздействие на их профильные поверхности.

### **Список использованных источников**

1. РД 24.260.09-87 — РД 24.260.12—87. Выбор конструкции, предельных отклонений размеров и параметров шероховатости основных конструктивных элементов лопаток осевых турбомашин при проектировании. – Л. : Изд-во НПО ЦКТИ, 1988. – 101 с.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. : Наука, 1974. 712 с.
3. Траупель В. Тепловые турбомшины. Том I / В. Траупель. – М. : ГЭИ, 1961. – 344 с.
4. Жуковский Т. В. Тепловые расчеты паровых и газовых турбин с помощью ЭВМ / Т. В. Жуковский. – Л. : Машиностроение, 1983. – 255 с.
5. Марков Н. М. Теория и расчет лопаточного аппарата осевых турбомашин / Н. М. Марков. – М. : Машиностроение, 1966. – 240 с.
6. Зальф Г. А. Тепловые расчеты паровых турбин / Г. А. Зальф, В. В. Звягинцев. – М. : МАШГИЗ, 1961. – 291 с.
7. Дейч М. Е. Исследования и расчеты ступеней осевых турбин / М. Е. Дейч, Б. М. Трояновский. – М. : Машиностроение, 1964. – 628 с.
8. Носовицкий А. И. Газодинамика влажнопаровых турбинных ступеней / А. И. Носовицкий, Г. Г. Шпензер. – Л. : Машиностроение, 1977. – 184 с.
9. Мазуренко А. С. Исследование течения в пограничном слое на шероховатой поверхности лопаток турбин / А. С. Мазуренко, К. В. Олесевиц // *Энергетическое машиностроение*. – 1974. – Вып. 18. – С. 69–73.

### **References**

1. RD 24.260.09-87 — RD 24.260.12—87. *Vybor konstrukcii, predelnyh odklonenij razmerov i parametrov sherohovatosti osnovnykh konstruktivnykh jelementov lopatok osevyh turbomashin pri proektirovanii* 1988, Izdatelstvo Nauchno-proizvodstvennogo obedinenija po issledovaniju i proektirovaniju jenergeticheskogo oborudovanija Centralnyj kotloturbinnyj institut, Leningrad.
2. Shlihting, G 1975, *Teorija pograničnogo sloja*, Nauka, Moskva.
3. Traupel, V 1961, *Teplovyje turbomashiny*, vol. I, Gumanitarno-jekologičeskij institut, Moskva.
4. Zhukovskij, TV 1983, *Teplovyje rasčety parovyh i gazovyh turbin s pomoshhju JeVM*, Mashinostroenie, Leningrad.
5. Markov, NM 1966, *Teorija i rasčet lopatočnogo apparata osevyh turbomashin*, Mashinostroenie, Moskva.
6. Zalf, GA & Zvjagincev, VV 1961, *Teplovyje rasčety parovyh turbin*, MASHGIZ, Moskva.
7. Dejch, ME & Trojanovskij, VM 1964, *Issledovanija i rasčety stupenej osevyh turbin*, Mashinostroenie, Moskva.
8. Nosovickij, AI & Shpenzer, GG 1977, *Gazodinamika vlazhno-parovyh turbinnih stupenej*, Mashinostroenie, Leningrad.
9. Mazurenko, AS & Olesevich, KV 1974, 'Issledovanie techenija v pograničnom sloe na sherohovatoj poverhnosti lopatok turbin', *Jenergetičeskoe mashinostroenie*, iss. 18, pp. 69-73.

Статья поступила в редакцию 19 марта 2020 г.