

3. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ

УДК 621.181

**Ал.А. Федяев, А.В. Сергеевичев, Ар.А. Федяев, Н.А. Вохмянин,
Н.Н. Вернер**

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Введение. Подача топлива в виде пыли через эжекционные горелки в рабочее пространство топки котельного агрегата выполняется вторичным воздухом с высокими скоростными характеристиками. В этом случае наиболее крупные несгоревшие частицы топлива зачастую оседают на поверхностях нагрева задней стенки экрана топки в диапазоне отметок по высоте экрана 5–8 м. Интенсивное шлакование поверхностей нагрева при этом приводит к снижению теплообмена, коэффициента полезного действия котлоагрегата и, в конечном итоге, к внеплановому текущему ремонту, а соответственно и к повышению непроизводительных эксплуатационных затрат.

С целью управления аэродинамическими режимами на задней стенке топки котла расположен узел подачи заднего дутья (ЗД), рациональная работа которого во многом способствует повышению надежности работы теплотехнологической установки в целом. Тогда подача встречных потоков горячего воздуха через ряд горизонтально расположенных сопел узла способствует созданию так называемой «воздушной завесы» для защиты заднего экрана рабочей зоны от оседания несгоревших частиц.

Правильная ориентация потоков энергоносителя в пространстве рабочей камеры с помощью заднего дутья позволяет выполнять ряд задач: рассеивание мощных потоков встречного вторичного воздуха (ВВ), подаваемых через две 4-х эжекционные горелки и параллельно транспортирующих пылевидное топливо; дополнительная турбулизация аэросмеси топлива, что способствует его более эффективному сгоранию; снижение вероятности образования в углах рабочей камеры вихревых застойных зон.

Отметка расположения узла подачи ЗД по высоте заднего экрана, угол подачи воздуха и его скоростные параметры определяют эффективность его работы [Видин, Федяев, 1999; Федяев, 1999]. Успешное выполнение перечисленных задач с помощью узла подачи ЗД, очевидно, требует неременной адаптации устройства при выборе конструкции горелок, варьировании их модификациями, пуске котла в эксплуатацию и его характеристик, колебании характеристик сжигаемого топлива и др.

Методика исследования. Для физического моделирования различных аэродинамических ситуаций были разработаны и изготовлены в масштабе 1:25 макет топки котла Б-50-14; эжекционные горелки; узел подачи ЗД; другие вспомогательные узлы и подводящие коммуникации. Для соблюдения автомодельности в реальных условиях в топке парового котла на "холодном" факеле с помощью насадка полного давления был проведен замер фрагментов полей скоростей струй ВВ через технологические отверстия в нескольких сечениях по вертикали и горизонтали (всего 13 контрольных точек).

На экспериментальном стенде измерение динамических характеристик проводилось в 8 горизонтальных сечениях (в каждом 55 контрольных точек), расположенных с равномерным шагом по высоте макета топки. Скоростные характеристики энергоносителя определялись с помощью миниатюрного насадка полного давления в комплекте с микроманометром с наклонной шкалой, а также термоанемометра с максимальной относительной погрешностью определения скорости 1,5–2,0 % [Федяев, Адомавичюс., 2000]. Направление воздушных струй контролировалось флажком. При опытах скорость потоков ВВ на срезах сопел горелок варьировалась в диапазоне от 6 до 15 м/с (что согласуется с пределами скоростей, полученных в реальных условиях), а потоков ЗД от 10 до 15 м/с.

Установка узла подачи ЗД осуществлялась в пересчете на реальные отметки от 8,15 до 9,3 м, а угол подачи потока с задней стенки устанавливался от 5 до 60°. Характер распределения полей скорости ВВ и заднего дутья идентичен во всем исследованном диапазоне скоростей (рис. 1), в том числе при различных вариантах подачи ВВ через сопла горелок (рис. 2) в топочное пространство, и отличается, как правило, величиной векторов скоростей в профилях.

Наиболее мощные и опасные, с точки зрения дальности, потоки аэросмеси образуются в нижней части топки, что особенно характерно для 1 варианта горелок (см. рис. 1). При максимальных динамических параметрах затопленных струй основного дутья (что близко к реальным условиям) наблюдаются повышенные значения скорости ВВ в районе задней стенки (5 сечение по горизонтальной оси) $W_{ВВ} = 2,5\text{--}2,8$ м/с (см. рис. 2,а).

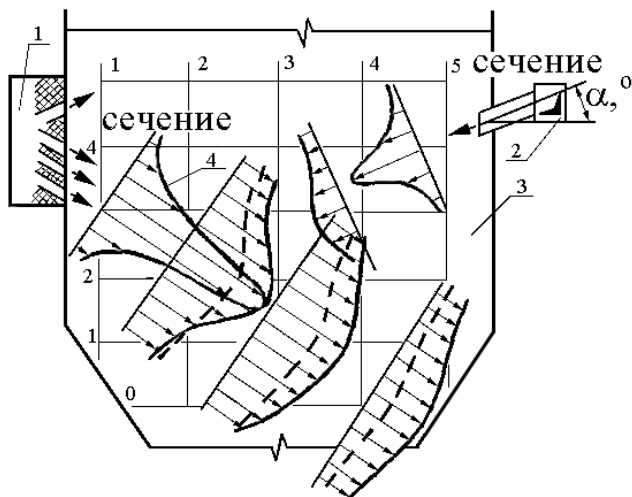


Рис. 1. Распределение эпюр скоростей вторичного воздуха в топочном пространстве

Пунктирная линия – деформация профилей ВВ при одновременной подаче заднего дутья.

1 – эжекционные горелки; 2 – узел заднего дутья; 3 – продольный разрез топки котла; 4 – профиль скорости вторичного воздуха; 5 – профиль скорости заднего дутья.

Fig. 1. Distribution of diagrams of secondary air velocities in the furnace space

The dotted line is the deformation of the airfoil profiles with the simultaneous supply of the rear blast. 1 – ejection burners; 2 – rear blast unit; 3 – longitudinal section of the boiler furnace; 4 – secondary air velocity profile; 5 – profile of the rear blast velocity.

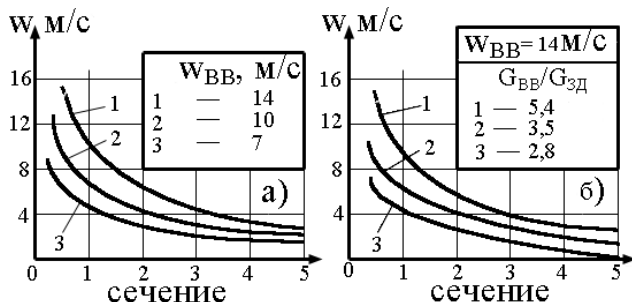


Рис. 2. Дальнобойность струй вторичного воздуха при выключенном (а) и включенном (б) потоке заднего дутья (1-й вариант горелок).

W – скорость; G – расход

Fig. 2. Range of secondary air jets with (a) off and on (b) the rear blast flow (burner version 1). W – speed; G – consumption

Математическое моделирование процессов гидродинамики, а также и тепломассообмена позволяет более качественно, быстро и в широких пределах изменения характеристик рабочих сред провести оценку влияния режимных параметров энергоносителей на эффективность работы промышленных установок [Федяев, 2000; Федяев и др., 2003; Федяев, 1999; Идельчик, 1983].

Расчетные исследования по определению профилей скорости при переменных режимах в трехмерной постановке проводились с помощью вычислительного комплекса PHOENICS. Основой вычислительной процедуры является неявная конечно – разностная схема, приводящая к консервативным системам алгебраических уравнений. На первом этапе в процессе решения область течения разбивается на небольшие дискретные элементы путем создания конечно – разностной сетки в направлениях трех координатных осей. Далее осуществляется интегрирование дифференциальных уравнений переноса по специально выделенным ячейкам сетки или контрольным объемам.

Течение в рабочих зонах теплотехнологических аппаратов на практике всегда турбулентно, при этом число Рейнольдса обычно так велико, что эффекты молекулярной вязкости проявляются только в пределах тонкого, так называемого ламинарного подслоя в непосредственной близости твердых стенок. В этом случае можно использовать К – Е модель турбулентности [Роди, 1983], не содержащую в уравнениях соотношений для масштаба турбулентности.

Достаточно полное изложение основ и особенностей данного метода приведено в работах [Патанкар, 1984; Жубрин и др., 1986, Мотулевич, Жубрин, 1988].

Результаты исследований. При экспериментальных исследованиях первоначально был рассмотрен вариант установки узла подачи ЗД на отметке 9,975 м (реальные условия) и проведена серия опытов при совместном истечении потоков ВВ из горелок и узла ЗД при подаче под различными углами $\alpha = 10\text{--}70^\circ$. При малых углах атаки (до 30°) защитный эффект практически отсутствует. При больших углах (более 30°) струи заднего дутья оказывают слабое воздействие на эпюры скоростей вторичного воздуха. При углах подачи ЗД в пределах $45\text{--}50^\circ$ наиболее заметно снижение скорости основного потока в области заднего экрана (при соотношениях расходов встречных потоков $G_{\text{вв}} / G_{\text{зд}} = 3,0\text{--}3,7$) до значений $W_{\text{вв}} = 1,5\text{--}1,7$ м/с и некоторое смещение полей скоростей вторичного воздуха ниже заданной траектории движения.

При малых углах подачи $\alpha = 5\text{--}30^\circ$ и установке узла подачи ЗД на верхних отметках порядка 8,8–9,3 м защитный эффект также не достигается, так как осевые линии векторов скоростей встречных потоков физически не пере-

секаются. При больших углах подачи $\alpha = 30\text{--}50^\circ$ происходит значительное смещение эпюр скоростей ВВ в нижнюю часть топочного пространства, т. е. весьма вероятно смещение факела в район “холодной” воронки.

Пиковая эффективность воздушной завесы ЗД достигается тогда, когда узел располагается для стационарного котла на отметках 8,15 – 8,35 – 8,55 м с соответствующими углами атаки $\alpha = 20\text{--}22\text{--}25^\circ$. При этом соотношение расходов потоков энергоносителей из горелок и узла подачи заднего дутья может варьироваться в пределах значений $G_{\text{ВВ}} / G_{\text{ЗД}} = 2,8\text{--}3,5$ (рис. 2,б).

В этих условиях достигается наиболее эффективная турбулизация потоков в рабочей зоне топки и падение скорости затопленных струй ВВ из горелок в районе заднего экрана до значений $W_{\text{ВВ}} = 0,5\text{--}0,7$ м/с.

В работе были также проведены экспериментальные исследования при использовании 2-го варианта эжекционных горелок [Федяев, 1999]. От 1-го варианта горелок, общий вид которых схематично приведен на рис. 1 (позиция 1), они отличаются более равномерной подачей потоков ВВ как в среднюю (два сопловых выхода), так и в нижнюю (также два сопловых выхода) область топочного пространства.

При рассмотрении 2 варианта горелок мощность потока в нижней области топки несколько слабее, чем для рассмотренного выше варианта, однако максимальная скорость потока в районе заднего экрана также достаточно высока – 2,5 м/с (рис. 3а). Наибольший защитный эффект достигается при установке узла подачи ЗД на отметках 8,2–8,35–8,6 м с соответствующими углами атаки $\alpha = 20\text{--}22\text{--}24^\circ$. При соотношении расходов встречных потоков в пределах $G_{\text{ВВ}} / G_{\text{ЗД}} = 2,7\text{--}2,9$ наблюдается падение скорости аэросмеси вблизи заднего экрана до $W_{\text{ВВ}} = 0,35\text{--}0,55$ м/с (рис. 3б).

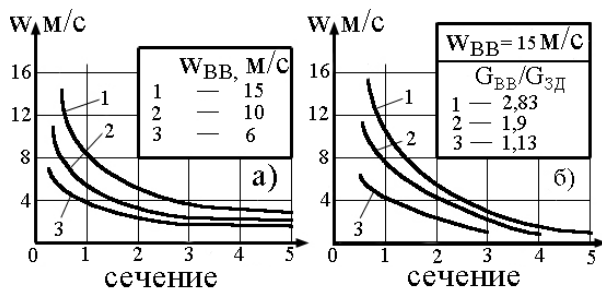


Рис. 3. Дальнобойность струй вторичного воздуха при выключенном (а) и включенном (б) потоке заднего дутья (2-й вариант горелок).

W – скорость; G – расход потока

Fig. 3. Range of secondary air jets with (a) off and on (b) rear blast flow (burner version 2). W – speed; G – flow rate

Смещение узла 3Д как выше, так и ниже рекомендуемых отметок приводит к неблагоприятным последствиям, отмеченным ранее для 1-го варианта горелочных устройств.

Результаты численных исследований достаточно хорошо согласуются с экспериментальными, что очевидно из представленного, к примеру, на рис. 4 расчета газодинамики топочной камеры котла в трехмерной постановке.

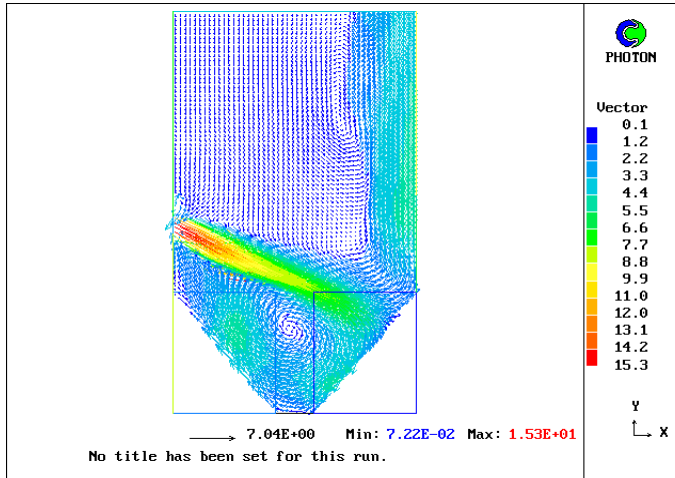


Рис. 4. Распределение профилей скорости основного потока вторичного воздуха в топочном пространстве при $W_{ВВ} = 15$ м/с (первый вариант горелок)

Fig. 4. Distribution of velocity profiles of the main flow of secondary air in the furnace space at $W_{ВВ} = 15$ m/s (the first version of the burners)

Последнее свидетельствует о широких возможностях использования отмеченного выше расчетного комплекса и предложенной математической модели для поиска, в частности, рациональных аэродинамических режимов работы теплотехнологических агрегатов [Видин, Федяев, 1999; Красников, Данилов, 1966; Федяев и др., 2003; Данилов, Коновальцев, 1995].

Полученные как опытные, так и расчетные данные позволили определить не только оптимальные пространственные рабочие параметры узла подачи заднего дутья и расходные характеристики энергоносителей для двух типов горелок, но и в пределах получить набор любых рациональных

параметров узла 3Д при изменении режима работы котлоагрегата, например, при снижении его нагрузки. Годовой экономический эффект от внедрения предложенных рекомендаций, часть которых приведена в данной работе, составил 315,6 т у.т. на один котлоагрегат.

Заключение. Использование результатов экспериментальных и численных исследований позволило практически исключить аварийные ситуации вследствие не эффективной работы воздушных завес заднего дутья. Работа имеет практическое применение.

Выводы

1. Корректировка рабочих параметров заднего дутья во многом определяет надежность работы котлоагрегатов и снижение непроизводительных затрат.

2. Для пылеугольных горелок котлоагрегатов Б-50-14, укомплектованных двумя 4-эжекционными горелками, подача заднего дутья с вертикальной отметки $8,35 \pm 0,2$ м при углах атаки $22^\circ \pm 2^\circ$ и расходах в пределах 30–35% от объема вторичного воздуха позволяет снизить динамические параметры последнего в районе заднего экрана топки в 4÷5 раз и практически исключить его шлакование.

Библиографический список

Видин Ю.В., Федяев А.А. Энергосбережение при сушке текстильных материалов сложной формы // Вестник Красноярского гос. ун-та. 1999. Вып. 19. С. 139–142.

Данилов О.Л., Коновальцев С.И. Энергосберегающий эффект за счет кинетической оптимизации сушки // Вестник Моск. энерг. ин-та. 1995. № 1. С. 81–84.

Жубрин С.В., Павицкий Н.И., Смагин В.В., Хрупов А.П. Вычислительное моделирование конвективного переноса в технологических установках. М.: МЭИ, 1986. 44 с.

Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). М.: Машиностроение, 1983. 351 с.

Красников В.В., Данилов В.А. Сушка бумаги и картона сопловым обдувом // Бумажная промышленность. 1966. № 2. С. 10–11.

Мотулевич В.П., Жубрин С.В. Численные методы расчета теплообменного оборудования. М.: Изд-во МЭИ, 1988. 54 с.

Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоиздат, 1984. 296 с.

Пат. № 2215251. Конвективная камерная сушилка / Федяев А.А., Федяев В.Н., Данилов О.Л. 2003.

Роди В. Примеры моделей турбулентности для течения несжимаемой жидкости // *Аэрокосмическая техника*. 1983. Т. 1. № 2. С. 112–119.

Федяев А.А. Совершенствование аэродинамических характеристик топочных камер // *Труды семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике*. Новосибирск, 1999. С. 191–192.

Федяев А.А. Совершенствование сопловых сушилок лушеного шпона // *Теплоэнергетика и технологии* : матер. конф. Каунасский технологический университет. Литва, Каунас: КТУ, 2000. С. 59–62.

Федяев А.А., Адомавичюс А.А. Снижение энергетических затрат в топке котла // *Теплоэнергетика и технологии* : матер. конф. Каунасского технологического университета. Каунас. Литва: КТУ, 2000. С. 23–26.

Федяев А.А., Видин Ю.В. Влияние аэродинамической обстановки в топке котла на снижение эксплуатационных затрат. *Гидродинамика больших скоростей* // *Вестник Красноярского гос. техн. ун-та*. 1999. Вып. 19. С. 122–125.

References

Danilov O.L., Konoval'cev S.I. Energoberegayushchij effekt za schet kineticheskoy optimizacii sushki. *Vestnik Mosk. energ. in-ta*, 1995, no. 1, pp. 81–84. (In Russ.)

Fedyayev A.A. Sovershenstvovanie aerodinamicheskikh harakteristik topochnykh kamer. *Trudy seminarov vuzov Sibiri i Dal'nego Vosto-ka po teplofizike i teploenergetike*. Novosibirsk, 1999, pp. 191–192. (In Russ.)

Fedyayev A.A. Sovershenstvovanie soplovykh sushilok lushchenogo shpona. *Teploenergetika i tekhnologii*: mater. konferencii Kaunasskij tekhnologicheskij universitet. Litva, Kaunas: KTU, 2000, pp. 59–62. (In Russ.)

Fedyayev A.A., Adomavichyus A.A. Snizhenie energeticheskikh zatrat v topke kotla. *Teploenergetika i tekhnologii*: mater. konferencii Kaunasskogo tekhnologicheskogo universiteta. Kaunas. Litva: KTU, 2000, pp. 23–26. (In Russ.)

Fedyayev A.A., Vidin Yu.V. Vliyanie aerodinamicheskoy obstanovki v topke kotla na snizhenie ekspluatatsionnykh zatrat. *Gidrodinamika bol'shih skorostej*. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 1999, iss. 19, pp. 122–125. (In Russ.)

Idel'chik I.E. Aerogidrodinamika tekhnologicheskikh apparatov. (Podvod, otvod i raspredelenie potoka po secheniyu apparatov). M.: Mashinostroenie, 1983. 351 p. (In Russ.)

Krasnikov V.V., Danilov V.A. Sushka bumagi i kartona soplovykh obduvom. *Bumazhnaya promyshlennost'*, 1966, no. 2, pp. 10–11. (In Russ.)

Motulevich V.P., Zhubrin S.V. CHislennyye metody rascheta teplo-obmennogo oborudovaniya. M.: Izd-vo MEI, 1988. 54 p. (In Russ.)

Patent na izobretenie № 2215251 Konvektivnaya kamernaya sushilka / Fedyaev A.A., Fedyaeva V.N., Danilov O.L. 2003. (In Russ.)

Patankar S. Chislennye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti. M.: Energoizdat, 1984. 296 p. (In Russ.)

Rodi V. Primery modelej turbulentnosti dlya techeniya neszhi-maemoj zhidkosti. *Aerokosmicheskaya tekhnika*, 1983, vol. 1, no. 2, pp. 112–119. (In Russ.)

Vidin Yu.V., Fedyayev A.A. Energoberezhenie pri sushke tekstil'nyh materialov slozhnoj formy. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo universiteta*, 1999, iss. 19, pp. 139–142. (In Russ.)

Zhubrin S.V., Pavickij N.I., Smagin V.V., Hrupov A.P. Vychislitel'noe modelirovanie konvektivnogo perenosa v tekhnologicheskikh ustanovkakh. M.: MEI, 1986. 44 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 26.09.2022

Федяев Ал.А., Сергеевичев А.В., Федяев Ар.А., Вохмянин Н.А., Вернер Н.Н. Управление режимами работы теплотехнологической установки // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 241. С. 218–228.* DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.218-228

Экспериментальным и расчетным путем определена рациональная аэродинамическая обстановка в топке пылеугольного котлоагрегата при различной ориентации в пространстве камеры потоков горячего воздуха из узла подачи заднего дутья. Численное моделирование процессов гидродинамики и тепломассообмена в топочном пространстве теплотехнологического устройства выполнено с помощью современного вычислительного комплекса PHOENICS. Показана возможность управления неравномерностью потоков энергоносителя в рабочей камере конкретного котлоагрегата, а значит и эффективными режимами его работы. Полученные как опытные, так и расчетные данные позволили определить не только оптимальные пространственные рабочие параметры узла подачи заднего дутья и расходные характеристики для двух типов горелок, но и получить набор рациональных параметров узла заднего дутья при изменении режима работы котлоагрегата, например, при плановых снижениях его нагрузки. Использование результатов исследований позволило практически исключить аварийные ситуации вследствие не эффективной работы воздушных завес заднего дутья.

Ключевые слова : аэродинамика, котлоагрегат, режимы работы, потоки энергоносителя.

Fedyayev Al.A., Sergeevichev A.V., Fedyayev Ar.A., Vokhmianin N.A., Verner N.N. Control of modes of operation of a heat-engineering installation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2022, iss. 241, pp. 218–228 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.218-228

The rational aerodynamic situation in the furnace of a pulverized coal boiler was determined experimentally and by calculation at different orientations in the space of the chamber of hot air flows from the rear blast supply unit. Numerical modeling of the processes of hydrodynamics and heat and mass transfer in the furnace space of a heat-

technological device was performed using the modern PHOENICS computer complex. The possibility of controlling the non-uniformity of energy carrier flows in the working chamber of a particular boiler unit, and hence the effective modes of its operation, is shown. Both experimental and calculated data obtained made it possible to determine not only the optimal spatial operating parameters of the rear blast supply unit and flow characteristics for two types of burners, but also to obtain a set of rational parameters of the rear blast unit when changing the operating mode of the boiler unit, for example, when new reductions in its load. The use of research results made it possible to practically eliminate emergency situations due to inefficient operation of the rear air curtains.

Key words : aerodynamics, boiler unit, operating modes, energy carrier flows.

ФЕДЯЕВ Александр Артурович – профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук. ORCID ID: 0000-0001-6233-3757. SPIN-код: 4618-5907.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vends@newmail.ru

FEDYAEV Alexander A. – DSc, St. Petersburg State Forest University. ORCID ID: 0000-0001-6233-3757. SPIN-code: 4618-5907.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: vends@newmail.ru

СЕРГЕЕВИЧЕВ Александр Владимирович – заведующий кафедрой прикладной механики и инженерной графики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук, профессор. Researcher ID: ABC-2274-2020, ORCID:0000-0003-3655-207X, SPIN-код: 4629-6720, Author ID: 433688

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: 910sav@gmail.com

SERGEEVICHEV Alexander V. – Professor, Doctor of Engineering, Head of the Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics, St. Petersburg State Forest Technical University. 194021, Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. Researcher ID: ABC-2274-2020, ORCID:0000-0003-3655-207X, SPIN-код: 4629-6720, Author ID: 433688

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: 910sav@gmail.com

ФЕДЯЕВ Артур Александрович – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета, кандидат технических наук. ORCID ID: 0000-0001-8036-7432. SPIN-код: 8169-9209.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: art_fedyayev@mail.ru

FEDYAEV Artur A. – PhD, St. Petersburg State Forest University. ORCID ID: 0000-0001-8036-7432. SPIN-code: 8169-9209.

194021, Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: art_fedyaev@mail.ru

ВОХМЯНИН Николай Александрович – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета, кандидат технических наук. ORCID ID: 0000-0001-7673-6987. SPIN-код: 8306-1032.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: 7520910@gmail.com

VOKHMIANIN Nikolay A. – PhD, St. Petersburg State Forest University. ORCID ID: 0000-0001-7673-6987. SPIN-code: 8306-1032.

194021, Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: 7520910@gmail.com

ВЕРНЕР Надежда Николаевна – доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета, кандидат технических наук. ORCID ID: 0000-0002-6766-0092. SPIN-код: 2608-2312.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: wernern@mail.ru

VERNER Nadezhda N. – PhD, St. Petersburg State Forest University. ORCID ID: 0000-0002-6766-0092. SPIN-код: 2608-2312.

194021, Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: wernern@mail.ru