

УДК 674.047

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.132

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

*Н.Б. Баланцева, канд. техн. наук, доц.**В.И. Мелехов, д-р техн. наук, проф.**О.А. Калиничева, канд. техн. наук, доц.*

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: n.balantseva@narfu.ru

Среди различных способов сушки древесины наиболее распространен метод конвективной камерной сушки. Режимы регламентируют процесс сушки пиломатериалов в зависимости от породы и размеров по времени или по влажностному состоянию древесины. В Руководящих технических материалах по сушке режимы устанавливаются в зависимости от влажностного состояния древесины. Режим сушки предусматривает контроль начальной влажности пиломатериалов путем отбора образцов из различных зон сушильного пакета для взвешивания, определения текущей влажности и закладки их обратно в штабель. Однако этот способ определения текущей влажности древесины требует периодического открывания рабочей камеры (что изменяет параметры сушильной среды) и перехода на одну из трех ступеней режима сушки. Процесс сушки характеризуется повышающейся жесткостью режима при уменьшении влажности пиломатериалов. Он должен обеспечивать наименьшую продолжительность процесса при сохранении естественных свойств древесины. Рассмотрен вопрос о применении метода расчета поля влажности пиломатериалов, так как переменные во времени режимы не дают точной информации о предполагаемом состоянии влаги во времени. Разработанный прием расчета распределения влаги в поперечном сечении пиломатериалов с использованием метода конечных элементов в виде множества треугольников, глобальных сеток жесткости и суммарных векторов нагрузки позволяет определять влагосодержание в узлах сетки. Сравнение кривых сушки, определенных по методу П.С. Сергеевского и по предложенному методу, показало, что последний дает более точные результаты.

*Ключевые слова:* конвективная сушка пиломатериалов, триангуляция Делоне, метод Галеркина, поле влагосодержания, система дифференциальных уравнений в частных производных, метод конечных элементов, система линейных алгебраических уравнений, уравнения влагопереноса.

### *Введение*

Сушка является ключевым технологическим процессом, коренным образом повышающим качество древесины. В результате этого процесса из биологически нестойкого, технологически нестабильного и неподдающегося отделке сырья она превращается в ценный материал, обладающий рядом уни-

---

*Для цитирования:* Баланцева Н.Б., Мелехов В.И., Калиничева О.А. Совершенствование метода расчета процесса конвективной сушки пиломатериалов // Лесн. журн. 2018. № 4. С. 132–139. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.132

кальных положительных свойств. Правильное проведение процесса сушки способствует повышению качества изделий из дерева и снижает количество отходов, обусловленных покоробленностью, растрескиванием, искривлением пиломатериалов.

Сушка древесины создает ряд специфических проблем, связанных с разнообразием физико-механических свойств разных пород, различием в размерах сортиментов, анизотропией свойств древесины, сложностью физических явлений, возникающих при сушке, большой продолжительностью процесса. Все это затрудняет совершенствование технологии сушки и препятствует математическому моделированию процесса.

Наиболее распространенный способ сушки древесины – камерная конвективная. В настоящее время в соответствии с Руководящими техническими материалами (РТМ) [8] режимы сушки для определенных пород и размеров пиломатериалов назначаются в зависимости от влажности древесины. Режим сушки должен обеспечивать наименьшую продолжительность процесса при сохранении естественных свойств древесины. Процесс сушки сопровождается увеличивающейся психрометрической разностью сушильной среды. Перед проведением сушки определяется начальная влажность пиломатериалов. С этой целью из различных зон штабеля отбираются пиломатериалы, из которых вырезаются заготовки. Часть заготовок после взвешивания высушивается, остальные закладываются в штабель пиломатериалов. В процессе сушки периодически необходимо заходить в сушильную камеру и взвешивать заложенные образцы для определения текущей влажности пиломатериалов. По текущей влажности задается режим сушки по РТМ [8]. При низкотемпературном процессе режимы подразделяются на мягкий, нормальный и форсированный. В зависимости от влагосодержания древесины задаются параметры сушки: температура «сухого» термометра  $t_c$ , разность температур «сухого» и «мокрого» термометров  $\Delta t$ , степень насыщенности сушильной среды  $\phi$ .

Ведение процесса низкотемпературной тепловоздушной сушки древесины в сушильных камерах производится с применением переменных режимов, в которых показатели агента сушки зависят от времени. Однако эти режимы относительно учитывают влажностное состояние древесины, не имеют обратной связи по состоянию влаги в процессе сушки. Совершенствование процесса сушки необходимо осуществлять в направлении контроля фактического состояния влаги в пиломатериалах. Существующие методы определения влагопереноса в пиломатериалах не решают эту задачу [6–9, 11]. В то же время применяемые в других отраслях промышленности системы автоматического регулирования на базе микропроцессорной техники могут быть использованы для поддержания высокой точности параметров конвективной сушки. Необходимо разработать научно-обоснованный подход к решению этой проблемы, используя современные средства математического обеспечения.

Цель исследования – совершенствование технологии конвективной сушки древесины на основе математического моделирования динамики процесса влагопереноса путем повышения достоверности и точности определения содержания влаги в древесине при сушке.

*Объекты и методы исследования*

Нами разработаны приемы расчета распределения влаги в поперечном сечении пиломатериалов, опирающиеся на элементное представление о процессе переноса влаги в нем [4].

Если перенос влаги сопровождается фазовыми переходами, то процесс сушки определяется общей системой уравнений, описывающих перенос влаги и тепла для любых сушильных процессов [7]:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial \tau} = k_{11} \nabla^2 u + k_{12} \nabla^2 T + k_{13} \nabla^2 P, \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} = k_{21} \nabla^2 u + k_{22} \nabla^2 T + k_{23} \nabla^2 P, \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} = k_{31} \nabla^2 u + k_{32} \nabla^2 T + k_{33} \nabla^2 P, \end{cases} \quad (1)$$

где  $u$  – концентрация влаги, кг/м<sup>3</sup>;

$k$  – коэффициент пропорциональности, согласующий размерности величин;

$\nabla$  – градиент;

$T$  – температура материала, К;

$P$  – давление внутри материала, Па.

Эта система дифференциальных уравнений в частных производных решается только для простейших случаев. Для низкотемпературной конвективной сушки общее уравнение влагопереноса имеет следующий вид [5, 9]:

$$i = -a' \rho_0 \Delta u + a' \rho_0 \delta \Delta t, \quad (2)$$

где  $i$  – поток влаги, кг/(с·м<sup>2</sup>);

$a'$  – коэффициент потенциалопродности влаги;

$\rho_0$  – плотность абсолютно сухой древесины;

$\delta$  – коэффициент термодиффузии.

В этом уравнении направления движения влаги под действием потенциалов влаги и температуры противоположны: влага переносится за счет градиента концентрации от центра к поверхности, а градиент температуры препятствует движению влаги к поверхности.

Существует ряд приемов, с помощью которых задача сводится к отысканию решения на множестве точек, составляющих дискретную сетку в данной области. Так как длина пиломатериалов намного больше размеров поперечного сечения, влагоперенос по длине пиломатериалов не учитывается, и задача сводится к двумерной. Задача изменения процесса сушки в двух измерениях решается методом конечных элементов [1, 2, 10–13]. При этом поперечное сечение представляется системой множества треугольников (рис. 1), в узлах сетки определяется концентрация влаги [4].

Уравнение, определяющее распределение влагосодержания в конечном элементе двумерной модели поперечного сечения пиломатериалов в соответствии с известным приемом Галеркина, в матричной форме имеет следующий вид [4]:

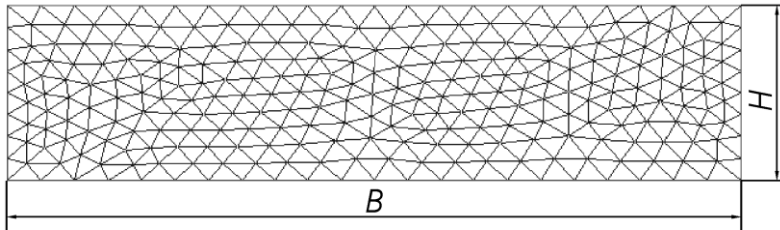


Рис. 1. Множество Делоне [3] для модели поперечного сечения пиломатериалов ( $B$  и  $H$  – ширина и толщина сечения соответственно)

$$[a_m^{(e)}] \cdot \{u\} = \{f_g^{(e)}\}, \quad (3)$$

где  $[a_m^{(e)}]$  – сетка влагопроводности;

$\{f_g^{(e)}\}$  – вектор влагообмена (суммарный вектор нагрузок).

Сетка влагопроводности:

$$[a_m^{(e)}] = \iint_A \left( a_{mx} \left[ \frac{\partial N_k}{\partial x} \right]^T \left[ \frac{\partial N_k}{\partial x} \right] + a_{my} \left[ \frac{\partial N_k}{\partial y} \right]^T \left[ \frac{\partial N_k}{\partial y} \right] \right) dA, \quad (4)$$

где  $a_{mx}$  и  $a_{my}$  – коэффициент влагопереноса по оси  $x$  и  $y$ ;

$[N_k]$  – однострочная сетка функций формы, аппроксимирующая распределение влаги;

$A$  – область одного из множеств.

Суммарный вектор нагрузок:

$$\{f_g^{(e)}\} = -\oint_s i_s n_s [N_k]^T ds, \quad (5)$$

где  $i$  – поток влаги;

$n$  – количество элементов;

$s$  – поверхность конечного элемента.

Уравнения (3)–(5) описывают общую конечно-элементную задачу влагопереноса в древесине в двух измерениях.

Для получения глобальных сеток жесткости и суммарных векторов нагрузок применяется принцип суперпозиции. По результатам сборки глобальных сеток жесткости и суммарных векторов нагрузок образуется система линейных алгебраических уравнений, решение которой приводит к определению влагосодержания  $W$  в узлах сетки.

По результатам математического моделирования и экспериментальным данным на рис. 2 представлено реальное распределение влагосодержания по сечению пиломатериалов. Некоторое различие объясняется неравномерностью влажности пиломатериалов по их длине.

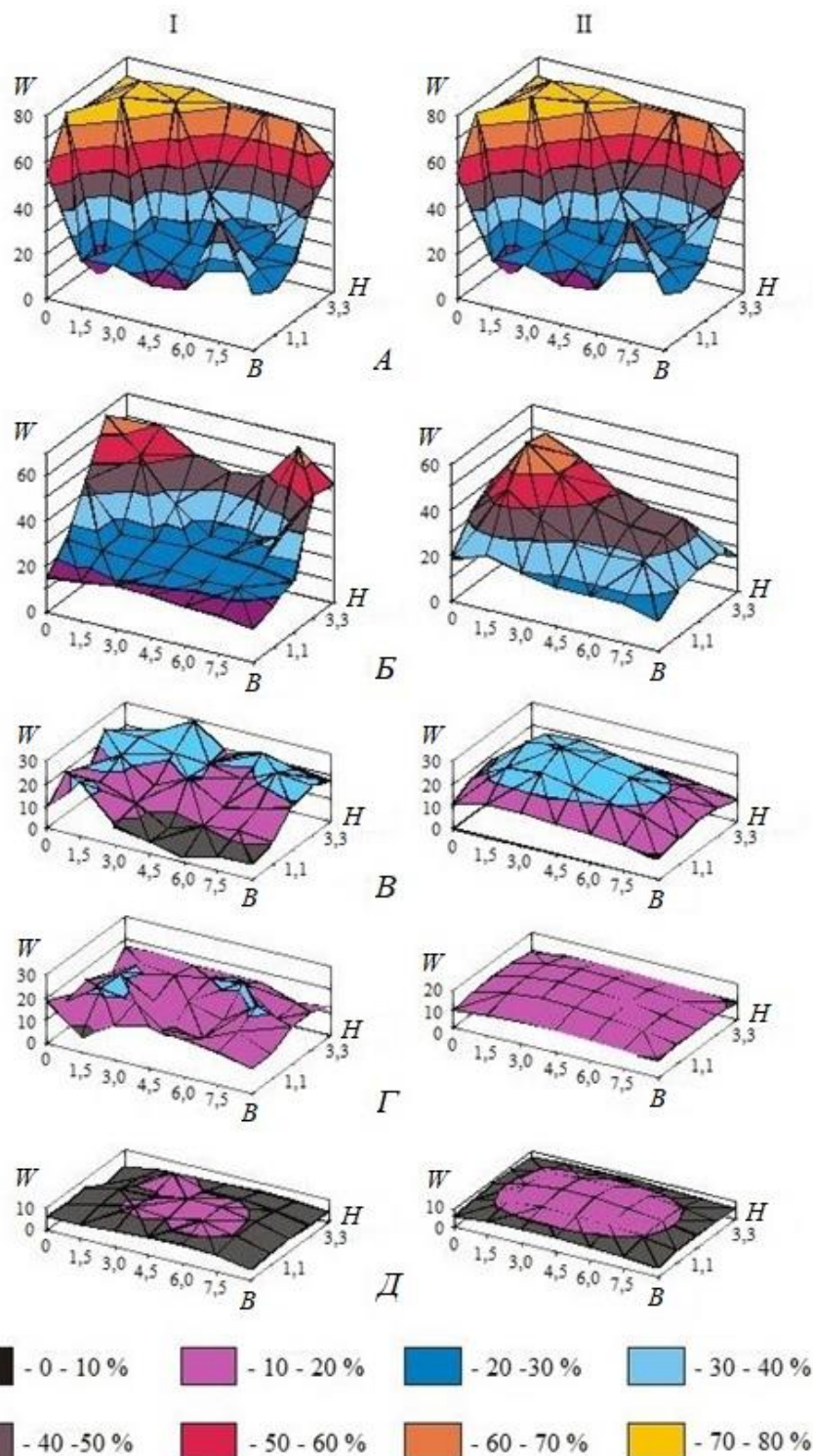


Рис. 2. Диаграммы распределения влагосодержания в поперечном сечении пиломатериалов в процессе сушки: I – экспериментальные образцы; II – расчетные образцы, построенные для того же момента времени (A – в момент начала сушки; B – через 24 ч; B – через 48 ч; Г – через 72 ч; Д – после извлечения из камеры; W, %; B, см; H, см)

Сравнение кривых сушки, полученных в ходе экспериментов и расчетных [4], приведено на рис. 3.

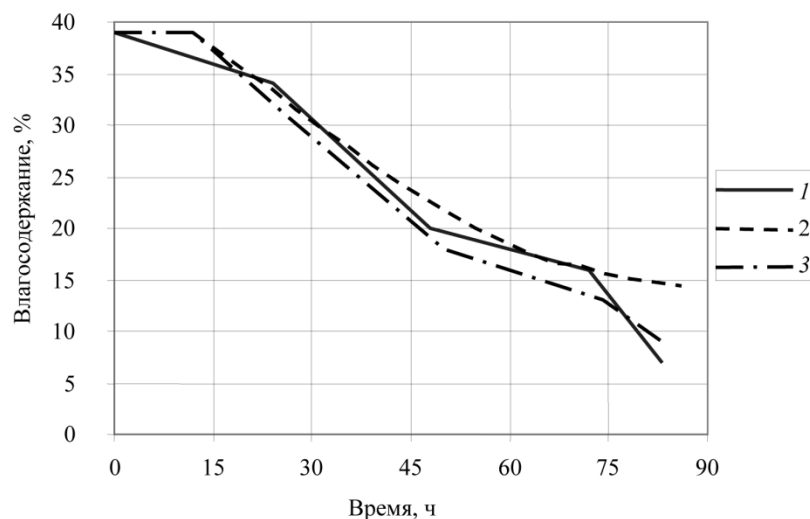


Рис. 3. Экспериментальный (1) и расчетные (2, 3) графики сушки пиломатериалов в камере: 2 – расчет по уравнению П.С. Серговского; 3 – по предложенной методике

Предложенный нами способ более точно характеризует процесс сушки при влаготермообработке и кондиционировании. При влажности пиломатериалов ниже 20 % по уравнению П.С. Серговского получается заниженный результат при оценке скорости сушки и завышенный – при оценке влагосодержания и времени сушки до конечной влажности. При влаготермообработке и кондиционировании. Оба способа (по уравнению П.С. Серговского и по предложенной методике) дают близкие результаты, но разработанный нами метод более точен.

#### Заключение

Проведенные исследования показали возможность определения численным методом влагосодержания пиломатериалов в процессе сушки.

Результаты исследования могут быть использованы для контроля и определения влагосодержания на основе математической модели при автоматическом управлении процессом сушки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баланцев Г.А., Баланцева Н.Б. Математическое описание свойств древесины для расчета влажности в процессе сушки // Наука – северному региону. Вып. 78. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2009. С. 9–12.
2. Баланцев Г.А., Баланцева Н.Б. Развитие методов расчета процессов влагопередачи при сушке древесины // Лесн. журн. 2009. № 5. С. 87–94. (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Баланцева Н.Б. Построение математической модели процесса сушки древесины // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. тр. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. Вып. 73. С. 11–14.

4. *Баланцева Н.Б.* Совершенствование технологии конвективной сушки пиломатериалов на основе моделирования динамики процесса: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: Изд-во САФУ, 2010. 148 с.
5. *Дьяконов К.Ф., Горяев А.А.* Сушка древесины токами высокой частоты. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 168 с.
6. *Кречетов И.В.* Сушка древесины. 3-е изд., перераб. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 432 с.
7. *Лыков А.В.* Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
8. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки пиломатериалов / ОАО «Научдревпром–ЦНИИМОД». Архангельск, 2000. 125 с.
9. *Серговский П.С.* Оборудование гидротермической обработки древесины. 2-е изд., перераб. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 304 с.
10. *Стренг Г., Фикс Дж.* Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977. 349 с.
11. *Шубин Г.С.* Физические основы и расчет процессов сушки древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 248 с.
12. *Bramhall G.* Mathematical Model for Lumber Drying // J. Wood Science. 1979. Vol. 12. Pp. 14–31.
13. *Hutton D.V.* Fundamentals of Finite Element Analysis. McGraw-Hill, 2004. 494 p.

Поступила 10.10.17

UDC 674.047

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.132

#### **Improvement of the Analysis Technique of the Convective Lumber Drying Process**

*N.B. Balantseva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

*V.I. Melekhov, Doctor of Engineering Sciences, Professor*

*O.A. Kalinicheva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;

e-mail: n.balantseva@narfu.ru

The method of convective kiln drying is the most common technique among the various methods of wood drying. Modes regulate the lumber drying process depending on the species and the size of the time or wood moisture content. The Reference specification on the technology of kiln drying of sawn timber prescribes regimes in dependence on the wood moisture content. The drying schedule provides control of the initial lumber moisture content by sampling from different areas of the drying stack for weighing, determining the current moisture content and putting them back into the stack. However, this method of determining the current moisture content of wood requires the periodic opening of the working kiln (which changes the parameters of the drying medium) and transition to one of the three stages of the drying schedule. The drying process is characterized by increasing operating severity with a decrease in the moisture content of sawn timber. The drying schedule should ensure the shortest drying time while maintaining the natural properties of wood. The article considers the application of the analysis technique of the moisture content field of lumber, since the time-varying regimes do not provide accurate information on the expected state of moisture over time. The developed method for calculating of the moisture distribution in the

---

*For citation:* Balantseva N.B., Melekhov V.I., Kalinicheva O.A. Improvement of the Analysis Technique of the Convective Lumber Drying Process. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 4, pp. 132–139. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.132

cross-section of sawn timber using the finite-element method in the form of a set of triangles, global stiffness grids and resultant load vectors allows determining the moisture content at the grid nodes. A comparison of the drying curves determined by the P.S. Sergovskiy's method and by the proposed method demonstrates the more accurate results of the second technique.

*Keywords:* convective lumber drying, Delaunay triangulation, Galerkin method, moisture content field, partial differential system, finite-element method, system of linear equations, moisture transfer equation.

#### REFERENCES

1. Balantsev G.A., Balantseva N.B. Matematicheskoe opisanie svoystv drevesiny dlya rascheta vlazhnosti v protsesse sushki [A Mathematical Description of Wood Properties for Moisture Calculating during the Drying Process]. *Nauka – severnomu regionu. Vyp. 78* [Science to the Northern Region. Issue 78]. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2009, pp. 9–12. (In Russ.)
2. Balantsev G.A., Balantseva N.B. Razvitie metodov rascheta protsessov vlagoperedachi pri sushke drevesiny [Development of Computation Methods for Moisture Transfer in Wood Drying]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2009, no. 5, pp. 87–94.
3. Balantseva N.B. Postroenie matematicheskoy modeli protsessa sushki drevesiny [Mathematical Model Development of the Lumber Drying Process]. *Okhrana okruzhayushchey sredy i ratsional'noe ispol'zovanie prirodnnykh resursov: sb. nauch. tr.* [Protection of the Environment and Rational Use of Natural Resources]. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007, iss. 73, pp. 11–14. (In Russ.)
4. Balantseva N.B. *Sovershenstvovanie tekhnologii konvektivnoy sushki pilomaterialov na osnove modelirovaniya dinamiki protsessa: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improvement of Convective Lumber Drying Technology on the Basis of Process Dynamics Modeling: Cand. Eng. Sci. Diss.]. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2010. 148 p.
5. D'yakov K.F., Goryaev A.A. *Sushka drevesiny tokami vysokoy chastoty* [Wood Drying by High Frequency Currents]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 168 p. (In Russ.)
6. Krechetov I.V. *Sushka drevesiny* [Wood Drying]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 432 p. (In Russ.)
7. Lykov A.B. *Teoriya sushki* [Drying Theory]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 472 p. (In Russ.)
8. *Rukovodyashchie tekhnicheskie materialy po tekhnologii kamernoy sushki pilomaterialov* [Reference Specification on the Technology of Kiln Drying of Sawn Timber]. Arkhangelsk, OAO Nauchdrevprom–TSNIIMOD Publ., 2000. 125 p. (In Russ.)
9. Sergovskiy P.S. *Oborudovanie gidrotermicheskoy obrabotki drevesiny* [Equipment for Hydrothermal Wood Processing]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 304 p. (In Russ.)
10. Strang G., Fix G.J. *An Analysis of the Finite Element Method*. US, Prentice-Hall, 1973. 306 p.
11. Shubin G.S. *Fizicheskie osnovy i raschet protsessov sushki drevesiny* [Physical Basis and Calculation of Wood Drying Processes]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 248 p. (In Russ.)
12. Bramhall G. Mathematical Model for Lumber Drying. *J. Wood Science*, 1979, vol. 12, pp. 14–31.
13. Hutton D.V. *Fundamentals of Finite Element Analysis*. McGraw-Hill, 2004. 494 p.

Received on October 10, 2017