



ВЕСТНИК

ГОМЕЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ П. О. СУХОГО

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С МАРТА 2000 г.

4(55)' 2013

Главный редактор

С. И. ТИМОШИН

Заместитель

главного редактора

А. А. БОЙКО

Ответственный

секретарь

Т. Г. ЯНУЩЕНКО

Редакционная коллегия:

О. Д. Асенчик, М. Н. Верещагин, В. А. Голуб,

Р. И. Громыко, Н. В. Грунтович, Н. П. Драгун,

Г. М. Лыч, Н. К. Мышкин, А. А. Панков,

Е. Н. Подденежный, Б. В. Сорвиров, А. В. Сычев,

Г. П. Тариков, Л. Г. Чубриков, О. Н. Шабловский,

А. П. Шевлюков, П. А. Хило, И. А. Мурашко, В. А. Ковтун

Адрес редакции:

Республика Беларусь, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48

Телефон: +375 232 401 568. Факс: +375 232 479 165

E-mail: machin@gstu.by

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

<i>Рогачевский Н. И. Измерительное межосевое расстояние эвольвентных колес с несимметричным профилем зубьев</i>	3
<i>Ровин Л. Е., Ровин С. Л. Ресурсосбережение при электроплавке</i>	11
<i>Прокопенко Д. В. Математическое и компьютерное моделирование несущей способности одиночной винтовой сваи с учетом уплотнения грунта</i>	25
<i>Тариков Г. П., Комраков В. В., Пархоменко В. Н., Бельский А. Т. Об одном методе определения предельного состояния элементов конструкций с повреждениями</i>	29
<i>Коробко И. В., Коваленко В. А. Особенности оптимизации формы чувствительных элементов вихревых измерительных преобразователей расхода жидкофазной среды</i>	36
<i>Тариков Г. П., Пархоменко В. Н. К решению контактной задачи термоупругости применительно к зубчатой передаче</i>	43
<i>Рехлицкий О. В., Чупрынин Ю. В. Рациональное распределение массы по опорам самоходного кормоуборочного комбайна</i>	49
<i>Попов В. Б. Влияние параметров механизма навески и плуга на тягово-энергетические показатели пахотного агрегата</i>	58

Теоретическая физика

<i>Варданян Р. С., Медведицков С. И. Отражение лучистой энергии от нестационарной стохастической среды</i>	65
--	----

Электротехника и энергетика

<i>Петраш В. Д., Чернышева И. В. Зависимость эффективности преобразования энергетических потоков от удельного расхода воздуха в системе стабилизирующего охлаждения вращающейся печи для промышленного теплоснабжения</i>	72
---	----

<i>Грунтович Н. В., Шенец Е. Л., Жеранов С. А. Оценка энергоэффективности модернизации производства листового стекла</i>	79
<i>Капанский А. А., Зализный Д. И. Автоматизация расчета теплового сопротивления кабеля</i>	87
<i>Грунтович Н. В., Петров И. В., Колесников П. М. Компьютерные системы технического диагностирования маслонаполненных трансформаторов</i>	94

Экономика и управление народным хозяйством

<i>Круглякова Г. В., Титоренко А. М. Продовольственная безопасность Республики Беларусь: состояние и проблемы обеспечения</i>	100
<i>Лапицкая О. В. Экономическая спелость леса в современных условиях</i>	108
<i>Тиличенко П. В., Дрозд С. С. Использование ABC- и XYZ-анализа для принятия решений в управлении продажами</i>	120

Резюме	126
---------------	-----

- Журнал включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований: по техническим наукам – машиностроение и машиноведение, материаловедение, энергетика (приказ ВАК РБ № 101 от 04.06.2005 г.); по экономическим наукам – экономика и управление промышленностью (приказ ВАК РБ № 26 от 02.02.2011 г.).
- Публикуемые материалы рецензируются.
- Мнение авторов статей не обязательно совпадает с позицией редколлегии.
- Перепечатка материалов, опубликованных в журнале, разрешается только с согласия автора и издателя.
- Подписные индексы: для индивидуальных подписчиков – 00063
для предприятий и организаций – 000632

Редакторы: Н. Г. Мансурова, Н. В. Гладкова, А. В. Власов, Т. Н. Мисюрова
Компьютерная верстка М. В. Кравцова

Подписано в печать 16.12.2013 г.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Ризография. Усл. печ. л. 15,81. Уч.-изд. л. 13,16.
Тираж 100 экз. Заказ № /62.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр
Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого.
ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48

© Учреждение образования
«Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2013

УДК 621.833.001.24

ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ МЕЖОСЕВОЕ РАССТОЯНИЕ ЭВОЛЬВЕНТНЫХ КОЛЕС С НЕСИММЕТРИЧНЫМ ПРОФИЛЕМ ЗУБЬЕВ

Н. И. РОГАЧЕВСКИЙ

*Государственное учреждение высшего профессионального
образования «Белорусско-Российский университет»,
г. Могилев, Республика Беларусь*

Введение

Технический уровень машин и технологического оборудования определяется соответствующим уровнем передаточных механизмов в их приводах, т. е. высокой нагрузочной способностью, надежностью, КПД, быстроходностью и низкой металлоемкостью. Такими свойствами обладают зубчатые передачи, являющиеся одними из наиболее распространенных в технике механизмов.

Зубчатые передачи работают в одном из двух режимов: 1) когда разноименные боковые поверхности зубьев работают примерно в одинаковых условиях; 2) когда работают в разных условиях, например, передачи авиационные, механизмов подъема груза, автомобильные, тракторные, технологического оборудования и других самых разнообразных машин и механизмов.

Исследования специалистов показали, что в передачах со вторым режимом работы целесообразно применять зубчатые колеса с несимметричным профилем зубьев (рис. 1).

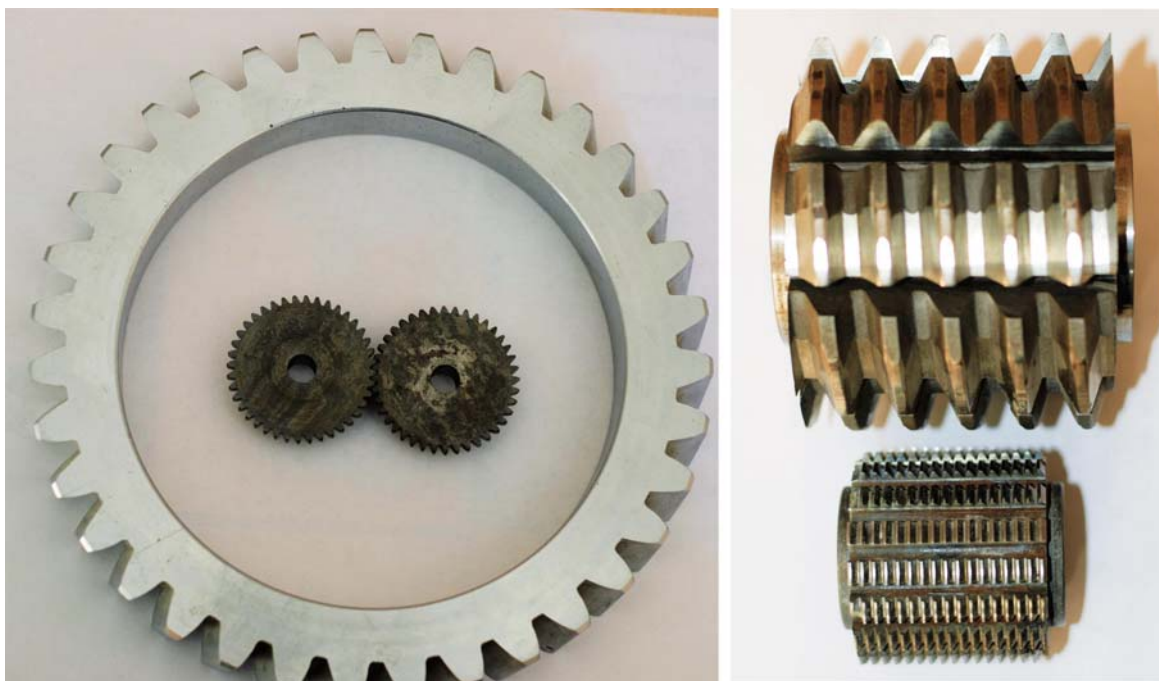


Рис. 1. Зубчатые колеса с несимметричными профилями зубьев с модулями $m = 5$ мм, $m = 1$ мм и фрезы для нарезания этих зубьев

Вопросы выявления преимуществ, исследования области существования, расчета геометрии и прочности зубчатых передач с несимметричным эвольвентным профилем зубьев, изложены в ряде работ [1]–[8]. Из данных работ следует, что снижение контактных и изгибных напряжений в передачах с несимметричным профилем зубьев достигается без изменения числа зубьев путем увеличения угла профиля на рабочей (передающей основную нагрузку) стороне зуба. В этих передачах доля скорости скольжения по отношению к скорости качения снижается, что способствует образованию контактной гидродинамической пленки, а значит – уменьшению износа и повышению КПД. Следовательно, задачи дальнейшего улучшения геометрии зацепления, разработки конструктивных факторов, повышающих нагрузочную способность и КПД, разработки вопросов улучшения технологии изготовления и контроля таких передач являются актуальными.

Анализ источников

Согласно ГОСТ 2.403–75, на чертеже зубчатого колеса, во второй части таблицы параметров зубчатого венца, должны быть приведены значения геометрических параметров для контроля взаимного положения разноименных профилей зубьев, которое является основным из факторов, определяющих величину бокового зазора передачи. Боковой зазор обеспечивает отсутствие заклинивания передачи и нормальные условия смазки. Наличие гарантированного бокового зазора компенсирует погрешности изготовления и сборки передачи, а также изменение размеров в результате температурных и упругих деформаций. Большой боковой зазор в передачах многих механизмов недопустим, так как это ведет к увеличению мертвого хода. Выбор оптимальной величины бокового зазора является для многих зубчатых передач одним из основных факторов, влияющих на эксплуатационные качества механизма.

С экономической точки зрения, целесообразно разработать методики расчета таких геометрических размеров, определяющих взаимное положение разноименных боковых поверхностей зубьев с несимметричным профилем, которые можно было бы контролировать методами и средствами, широко применяемыми при контроле колес с обычными симметричными зубьями: 1) измерением длины общей нормали; 2) кромочным зубомером; 3) тангенциальным зубомером; 4) измерением размеров зубчатых колес по роликам (шарикам); 5) по измерительному межосевому расстоянию.

Из вышеперечисленных методов только первым невозможно контролировать зубчатые колеса с несимметричным профилем зубьев, так как показания нормалеметра в этом случае зависят от угла поворота его вокруг оси колеса и от ширины его измерительных поверхностей.

Определения параметров для контроля таких зубьев вторым, третьим и четвертым методами изложены в работах [7]–[14]. Использование этих методов целесообразно для единичного и мелкосерийного производств, для других (крупносерийного и массового) производств рекомендуется пятый метод контроля (по измерительному межосевому расстоянию). В литературе отсутствует методика определения метрических размеров для проверки взаимного положения разноименных боковых поверхностей зубьев с несимметричным профилем по измерительному межосевому расстоянию $a_{\text{ви}}$ (рис. 2), что сдерживает широкое внедрение в производство передач с такими зубьями. Встала задача заполнить этот пробел.

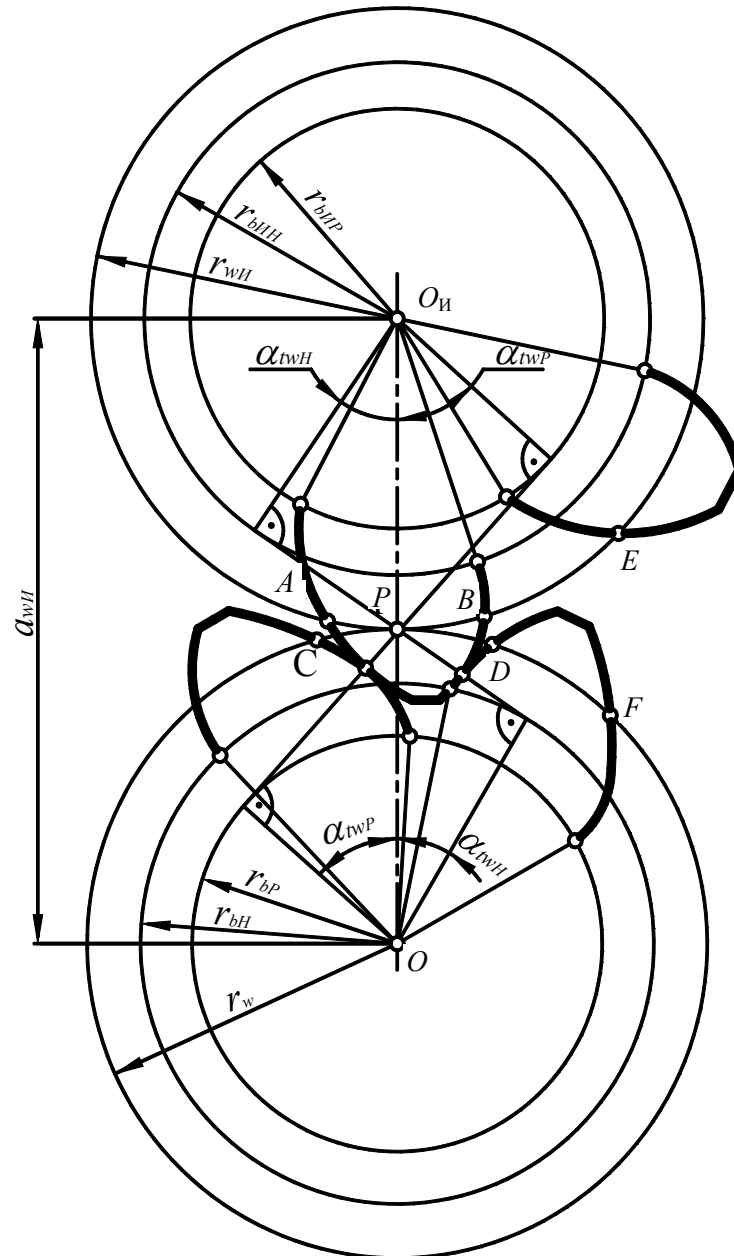


Рис. 2. Схема беззазорного зацепления контролируемого и контрольного зубчатых колес в их торцовой плоскости: P – полюс зацепления

Измеряют отклонения измерительного межосевого расстояния в ходе беззазорной обкатки проверяемого колеса с измерительным при окончательном контроле зубьев [15]. Несмотря на то что зацепление зубчатых колес в процессе контроля производится в условиях, близких к эксплуатационным, этот метод отражает далеко не полную картину взаимного положения разноименных профилей зубьев из-за влияния на отклонения измерительного межосевого расстояния других погрешностей зубчатого колеса, особенно погрешности направления зубьев. Поэтому он применим для контроля зубчатых колес шестой и более грубых степеней точности [15]. В процессе плотного беззазорного обката контролируемого зубчатого колеса с измерительным выявляется суммарная погрешность взаимодействия двух пар профилей зубьев сопряженных колес, при этом погрешностями измерительного колеса пренебрегают. Последнее выбирается точнее контролируемого колеса не меньше, чем на две степени точности [15]. Основ-

ное преимущество данного метода – производительность, отступает перед техническими трудностями при применении его в единичном и мелкосерийном производстве, так как необходимость применения измерительных колес делает этот контроль практически малоприменимым: ведь невозможно иметь на каждое производимое свое измерительное колесо. Широкое применение этот метод нашел в крупносерийном и массовом производствах традиционных зубчатых колес.

Целью настоящей работы является разработка методики расчета предельных размеров измерительного межосевого расстояния, служащих для контроля взаимного положения разноименных боковых поверхностей зубьев с несимметричным эвольвентным профилем, позволяющих обеспечить техническую документацию производства зубчатых колес с такими зубьями научно обоснованными контрольными параметрами.

Методы исследования

Аналитические зависимости по определению предельных размеров зубчатых колес для контроля взаимного положения разноименных боковых поверхностей несимметричных зубьев получены точными методами геометрии, кинематики и математического анализа.

Основная часть

Ниже изложена методика определения предельных размеров измерительного межосевого расстояния зубчатых колес цилиндрических эвольвентных внешнего зацепления с несимметричным профилем зубьев, выполненных из недеформируемых материалов, с равным нулю предельными отклонениями от номинальных параметров этих колес, кроме номинального коэффициента смещения x^* и диаметра вершин зубьев d_a .

Термины, обозначения их символами и размерности соответствуют ГОСТ 16530–83 и ГОСТ 16531–83, за исключением дополнительных терминов и обозначений, которые понадобились для изложения материала. Величины, относящиеся к разноименным поверхностям зуба с несимметричным профилем, снабжены индексами: «Р» относится к условной рабочей поверхности (с большим углом профиля α) зуба, а «Н» – к нерабочей. Если же параметр относится к любой из указанных поверхностей зуба, то он пишется без индексов или с обоими индексами, например, под записью $\alpha_{р,н}$ или α понимают α_p и α_n . Величины, относящиеся к измерительному зубчатому колесу, снабжают индексом «И».

Исходные данные для расчета: $\alpha_{р,н}$ – углы профиля на рабочей и нерабочей стороне зуба, градусов; β – угол наклона линии зуба, градусов; m – модуль; x – коэффициент смещения контролируемого зубчатого колеса; x_i – коэффициент смещения измерительного зубчатого колеса; z – число зубьев контролируемого зубчатого колеса; z_i – число зубьев измерительного зубчатого колеса; $E_{НС}$ – наименьшее дополнительное смещение исходного контура контролируемого зубчатого колеса, мкм. Значение $E_{НС}$ определяют, используя ГОСТ 1643–81, по виду сопряжения зубьев, степени точности по нормам плавности и делительному диаметру $d = 2r = mz / \cos \beta$; $E_{НСИ}$ – наименьшее дополнительное смещение исходного контура измерительного зубчатого колеса, мкм. Принимают $E_{НСИ} = 0$, т. е. погрешностью измерительного колеса пренебрегают, так как его выполняют точнее контролируемого не меньше, чем на две степени точности; T_H – допуск на смещение исходного контура контролируемого зубчатого колеса, мкм. Величину T_H определяют по таблицам ГОСТ 1643–81 в зависимости от вида сопряжения зубьев, вида допуска бокового зазора и значения ради-

ального биения зубчатого венца F_r , мкм, которое назначают по тому же стандарту, исходя из величин m , d и степени кинематической точности; $T_{\text{НИ}}$ – допуск на смещение исходного контура измерительного зубчатого колеса, мкм. Принимают $T_{\text{НИ}} = 0$ по той же причине, что и $E_{\text{НСИ}}$.

По известным [10] формулам определим:

$$\alpha_{tP,H} = \arctg(\operatorname{tg} \alpha_{P,H} / \cos \beta);$$

$$\alpha_{bP,H} = d \cos \alpha_{tP,H};$$

$$x^* = x - (|E_{\text{НС}}| + T_H / 2) / (1000m);$$

$$x_{\text{И}}^* = x_{\text{И}} - (|E_{\text{НСИ}}| + T_{\text{НИ}} / 2) / (1000m).$$

При безззорном зацеплении толщина зуба $S_{t\omega\text{И}} = AB$ по дуге начальной окружности измерительного колеса должна быть равна ширине впадины $e_{t\omega} = CD$ по дуге начальной окружности контролируемого колеса и наоборот (рис. 2) $e_{t\omega\text{И}} = BE$ должна быть равна $S_{t\omega} = DF$:

$$S_{t\omega\text{И}} = e_{t\omega};$$

$$e_{t\omega\text{И}} = S_{t\omega}.$$

Суммируя почленно изложенные равенства, получим:

$$p_{t\omega} = S_{t\omega\text{И}} + e_{t\omega\text{И}} = e_{t\omega} + S_{t\omega} = S_{t\omega\text{И}} + S_{t\omega}, \quad (1)$$

где $p_{t\omega}$ – начальный торцовый шаг зубьев:

$$p_{t\omega} = \frac{\pi d_{\omega}}{z} = \frac{\pi d_{\omega\text{И}}}{z_{\text{И}}} = \frac{\pi(d_{\omega} + d_{\omega\text{И}})}{z + z_{\text{И}}}. \quad (2)$$

Из рис. 2 и 3 видно, что параметры $S_{t\omega\text{И}}$ и $S_{t\omega}$ определены уравнениями:

$$S_{t\omega\text{И}} = \left\{ \frac{1}{z_{\text{И}}} [\pi + 2x_{\text{И}}^* (\operatorname{tg} \alpha_P + \operatorname{tg} \alpha_H)] + \operatorname{inv} \alpha_{tP} + \operatorname{inv} \alpha_{tH} - \operatorname{inv} \alpha_{t\omega\text{И}P} - \operatorname{inv} \alpha_{t\omega\text{И}H} \right\} \frac{d_{\omega\text{И}}}{2}, \quad (3)$$

$$S_{t\omega} = \left\{ \frac{1}{z} [\pi + 2x^* (\operatorname{tg} \alpha_P + \operatorname{tg} \alpha_H)] + \operatorname{inv} \alpha_{tP} + \operatorname{inv} \alpha_{tH} - \operatorname{inv} \alpha_{t\omega P} - \operatorname{inv} \alpha_{t\omega H} \right\} \frac{d_{\omega}}{2}. \quad (4)$$

Углы профиля на начальных окружностях обоих зубчатых колес одинаковы (рис. 2), поэтому

$$\operatorname{inv} \alpha_{t\omega\text{И}P} = \operatorname{inv} \alpha_{t\omega P};$$

$$\operatorname{inv} \alpha_{t\omega\text{И}H} = \operatorname{inv} \alpha_{t\omega H}.$$

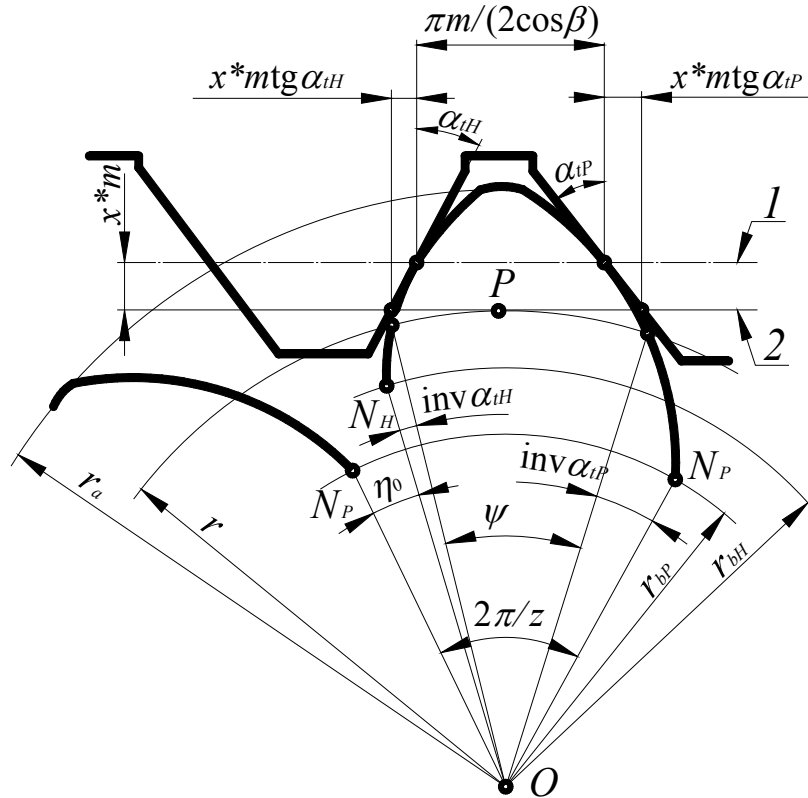


Рис. 3. Схема образования торцового несимметричного профиля зуба:
1 – делительная прямая; 2 – начальная прямая; P – полюс зацепления

Подставив выражения (2)–(4) в формулу (1), полученное уравнение делим на $d_{\omega И}/2$, учитывая, что

$$\frac{d_{\omega}}{d_{\omega И}} = \frac{z}{z_{И}},$$

после преобразования получим:

$$\frac{2}{z + z_{И}} (\operatorname{tg} \alpha_P + \operatorname{tg} \alpha_H) (x^* + x_{И}^*) + \operatorname{inv} \alpha_{rP} + \operatorname{inv} \alpha_{rH} - \operatorname{inv} \alpha_{r\omega P} - \operatorname{inv} \alpha_{r\omega H} = 0. \quad (5)$$

Из построения рис. 2 видно, что

$$\alpha_{r\omega H} = \arccos \left(\frac{d_{bH} \cos \alpha_{r\omega P}}{d_{bP}} \right).$$

Подставив в уравнение (5) вместо $\alpha_{r\omega H}$ последнее выражение, получим:

$$\frac{2}{z + z_{И}} (\operatorname{tg} \alpha_P + \operatorname{tg} \alpha_H) (x^* + x_{И}^*) + \operatorname{inv} \alpha_{rP} + \operatorname{inv} \alpha_{rH} - \operatorname{inv} \alpha_{r\omega P} - \operatorname{inv} \arccos \left(\frac{d_{bH} \cos \alpha_{r\omega P}}{d_{bP}} \right) = 0.$$

Полученное уравнение представим в развернутом виде

$$\frac{2}{z + z_{И}} (\operatorname{tg} \alpha_P + \operatorname{tg} \alpha_H) (x^* + x_{И}^*) + \operatorname{tg} \alpha_{rP} - \alpha_{rP} + \operatorname{tg} \alpha_{rH} - \alpha_{rH} - \operatorname{tg} \alpha_{r\omega\omega} + \alpha_{r\omega\omega} -$$

$$- \operatorname{tg}[\arccos(\frac{d_{bH}}{d_{bP}} \cos \alpha_{\omega P})] + \arccos(\frac{d_{bH}}{d_{bP}} \cos \alpha_{\omega P}) = 0, \quad (6)$$

где углы α_P , α_H , $\alpha_{\omega P}$ – в радианах.

Из нелинейного уравнения (6) определим численными методами [16] значение $\alpha_{\omega P}$. Наиболее предпочтительным для применения является метод деления отрезка пополам. Метод типично программируемый, так как вычисления по нему простые и цикличные. Он обладает достаточно быстрой сходимостью.

Измерительное межосевое расстояние (рис. 2):

$$a_{\omega H} = \frac{d_{bP} + d_{bPH}}{2 \cos \alpha_{\omega P}} = \frac{m(z + z_H)}{2 \cos \beta} \frac{\cos \alpha_P}{\cos \alpha_{\omega P}}.$$

Модуль предельного отклонения размера $a_{\omega H}$:

$$\Delta a_{\omega H} = \Delta x^* \frac{da_{\omega H}}{dx^*} = \frac{T_H}{2m} \frac{da_{\omega H}}{dx^*} = \frac{T_H}{2000} \frac{z + z_H}{2 \cos \beta} \cos \alpha_P \frac{\sin \alpha_{\omega P}}{\cos^2 \alpha_{\omega P}} \frac{d\alpha_{\omega P}}{dx^*}.$$

Выражение для $d\alpha_{\omega P}/dx^*$ находят из равенства, полученного дифференцированием по x^* уравнения (6):

$$\frac{d\alpha_{\omega P}}{dx^*} = \frac{2}{z + z_H} (\operatorname{tg} \alpha_P + \operatorname{tg} \alpha_H) / \left[\frac{1}{\cos^2 \alpha_{\omega P}} - 1 - \frac{d_{bH} \sin \alpha_{\omega P}}{\sqrt{d_{bP}^2 - d_{bH}^2 \cos^2 \alpha_{\omega P}}} \left(1 - \frac{d_{bP}^2}{d_{bH}^2 \cos^2 \alpha_{\omega P}} \right) \right].$$

Подставив последнее равенство в предыдущее, получим:

$$\Delta a_{\omega H} = \frac{T_H}{2000} \frac{\operatorname{tg} \alpha_P + \operatorname{tg} \alpha_H}{\cos \beta} \cos \alpha_P \times \\ \times \frac{\sin \alpha_{\omega P}}{\cos^2 \alpha_{\omega P}} / \left[\frac{1}{\cos^2 \alpha_{\omega P}} - 1 - \frac{d_{bH} \sin \alpha_{\omega P}}{\sqrt{d_{bP}^2 - d_{bH}^2 \cos^2 \alpha_{\omega P}}} \left(1 - \frac{d_{bP}^2}{d_{bH}^2 \cos^2 \alpha_{\omega P}} \right) \right].$$

Предельные отклонения измерительного межосевого расстояния: верхнее $A_{a_e}^+ = \Delta a_{\omega H}$, нижнее $A_{a_i}^- = -\Delta a_{\omega H}$.

Для годности измеряемого зубчатого колеса необходимо, чтобы за оборот его измеренное значение отклонения измерительного межосевого расстояния $\Delta a_{\omega H}$ находилось в пределах

$$A_{a_i}^- \leq \Delta a_{\omega H} \leq A_{a_e}^+.$$

Заключение

Разработанная методика расчета предельных размеров измерительного межосевого расстояния, служащих для контроля взаимного положения разноименных боковых поверхностей зубьев с несимметричным эвольвентным профилем, позволит обеспечить техническую документацию крупносерийного и массового производства зубчатых колес с такими зубьями научно обоснованными контрольными параметрами.

Литература

1. Вулгаков, Э. Б. Синтез зубчатых колес с несимметричным профилем зубьев / Э. Б. Вулгаков, Г. В. Ривкин // Производство зубчатых колес и вопросы надежности : сб. науч. тр. Омск. политехн. ин-та. – Омск, 1975. – С. 79–86.
2. Вулгаков, Э. Б. Проектирование зубчатых колес с несимметричным профилем зубьев / Э. Б. Вулгаков, Г. В. Ривкин // Машиноведение. – 1976. – № 5. – С. 35–39.
3. Вулгаков, Э. Б. Обобщенная область существования эвольвентного зубчатого зацепления с несимметричным профилем зубцов / Э. Б. Вулгаков, Г. В. Ривкин // Машиноведение. – 1980. – № 1. – С. 55–59.
4. Иосилевич, Г. Б. Концентрация напряжений и деформаций в деталях машин / Г. Б. Иосилевич. – М. : Машиностроение, 1981. – 224 с.
5. Василенок, В. Д. Расчет геометрии эвольвентных передач с несимметричным зубом / В. Д. Василенок ; Могилев. машиностр. ин-т. – Могилев, 1981. – 24 с. : ил. – Библиогр.: 9 назв. – Деп. в БелНИИТИ 08.01.82, № 337.
6. Василенок, В. Д. Определение напряжений изгиба в несимметричных зубьях / В. Д. Василенок ; Могилев. машиностр. ин-т. – Могилев, 1981. – 9 с. : ил. – Библиогр.: 4 назв. – Деп. в БелНИИТИ 08.01.82, № 338.
7. Болотовский, И. А. Эвольвентные зубчатые колеса с несимметричными зубьями / И. А. Болотовский, О. Ф. Васильева, В. П. Котельников // Вестн. машиностроения. – 1984. – № 4. – С. 15–17.
8. Андожский, В. Д. Эвольвентные зубчатые колеса с несимметричным профилем зубьев / В. Д. Андожский, Н. И. Рогачевский // Вестн. машиностроения. – 1988. – № 10. – С. 32–34.
9. Рогачевский, Н. И. Параметры зубчатого колеса для контроля взаимного положения разноименных профилей несимметричных зубьев накладным зубомером / Н. И. Рогачевский // Изв. вузов. Машиностроение. – 1983. – № 8. – С. 154–156.
10. Рогачевский, Н. И. Определение размера по роликам зубчатых колес с несимметричным профилем зубьев / Н. И. Рогачевский ; Могилев. машиностр. ин-т. – Могилев, 1980. – 62 с. : ил. – Библиогр.: 5 назв. – Деп. в БелНИИТИ 22.07.80, № 171.
11. Андожский, В. Д. Теория определения размера по роликам / В. Д. Андожский, Н. И. Рогачевский ; Могилев. машиностр. ин-т. – Могилев, 1981. – 75 с. : ил. – Библиогр.: 6 назв. – Деп. в БелНИИТИ 23.05.81, № 302.
12. Рогачевский, Н. И. Размер по роликам (шарикам) зубчатых колес с несимметричным профилем зубьев / Н. И. Рогачевский // Машиноведение. – 1983. – № 5. – С. 35–38.
13. Рогачевский, Н. И. Выбор роликов (шариков) при измерении зубчатых колес / Н. И. Рогачевский // Изв. вузов. Машиностроение. – 1985. – № 4. – С. 27–31.
14. Рогачевский, Н. И. Размеры зубчатых колес и секторов по роликам (шарикам) при измерении зубчатых колес / Н. И. Рогачевский // Изв. вузов. Машиностроение. – 1986. – № 7. – С. 24–28.
15. Марков, А. Л. Измерение зубчатых колес. Допуски, методы и средства контроля / А. Л. Марков. – Л. : Машиностроение ; Ленингр. отд-ние, 1977. – 279 с.
16. Волков, Е. А. Численные методы : учеб. пособие / Е. А. Волков. – СПб. : Лань, 2008. – 256 с.

Получено 11.09.2013 г.

УДК 660.046.4:669.187.2

РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ЭЛЕКТРОПЛАВКЕ**Л. Е. РОВИН***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь***С. Л. РОВИН***Научно-производственное республиканское дочернее
унитарное предприятие «Технолит», г. Минск,
Республика Беларусь***Введение**

Среди способов интенсификации и ресурсосбережения при электроплавке особое место занимает предварительный подогрев шихты. В последние годы разработан ряд конструкций как встроенных, так и автономных устройств подогрева, с использованием тепла печных газов и/или природного газа. Установки различаются по температуре нагрева, удельной производительности и экологическим характеристикам. В статье представлен аналитический обзор известных устройств, предложены критерии выбора оптимальных технических решений, сделан вывод о перспективности применения высокотемпературного подогрева шихты, в том числе в загрузочных бадах нового типа, что позволит применить способ для существующих печей без остановки производства и крупных капиталовложений.

Эффективность способов ресурсосбережения

Интенсификация технологических процессов – наиболее перспективное направление в ресурсосбережении и повышении экономической эффективности плавки. Металлургами за последние десятилетия разработан ряд технических решений (приемов), которые обеспечили существенное повышение производительности печей, снижение энергоемкости и эксплуатационных затрат, улучшение экологических характеристик плавки и качества полученного металла.

На рис. 1 представлены лишь некоторые из наиболее значимых мероприятий, внедрение которых привело за последние годы к сокращению удельных затрат электроэнергии при дуговой плавке в 2,5 раза, расхода электродов в 4,3 раза, продолжительности плавильной кампании почти в 5 раз. При всей условности приведенных зависимостей, интерполированных до 2015 г., можно заметить, что если технологические возможности плавки – показателями чего являются производительность (длительность кампании) и удельный расход электродов – близки к максимально возможным для ЭДП, то в отношении удельных затрат электроэнергии перспективы далеко не исчерпаны.

При этом следует отметить, что теоретический предел – сумма энтальпии жидких стали и шлака – «преодолен», т. е. удельные затраты электроэнергии уже ниже суммарного значения энтальпии получаемых расплавов $420\text{--}480 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$. Дефицит энергии компенсируется ростом термического КПД печей и увеличением вносимой доли тепла от более дешевых источников: уголь, природный газ, тепловая энергия отходящих газов (ВЭР).

Сравнительный анализ эффективности известных способов сокращения удельных затрат электроэнергии на плавку дает ориентировочно следующее соотношение (при общих затратах $\sim 650\text{--}680 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$): дожигание СО непосредственно в рабочем пространстве путем дополнительной подачи воздуха или кислорода – 6 %, работа на вспененных шлаках – 9 %, повышение удельной мощности печных трансформаторов (работа на длинных дугах) – 10 %, вдувание кислорода в ванну металла (с корректировкой углеродосодержащего компонента) – 10 %, использование в завалке жидкого чугуна – 10 %, использование топливно-кислородных или плазменных горелок – 12 %, высокотемпературный подогрев шихты – до 22 %.

При этом эффект высокотемпературного подогрева шихты (ВПШ) очевидно пропорционален температуре нагрева или энтальпии загружаемых материалов. Верхний предел может быть ограничен только опасностью угара тонколистового скрапа при длительном нагреве свыше 700°C в окислительной среде или свариванием кусков скрапа при температурах выше $900\text{--}1000^\circ\text{C}$.

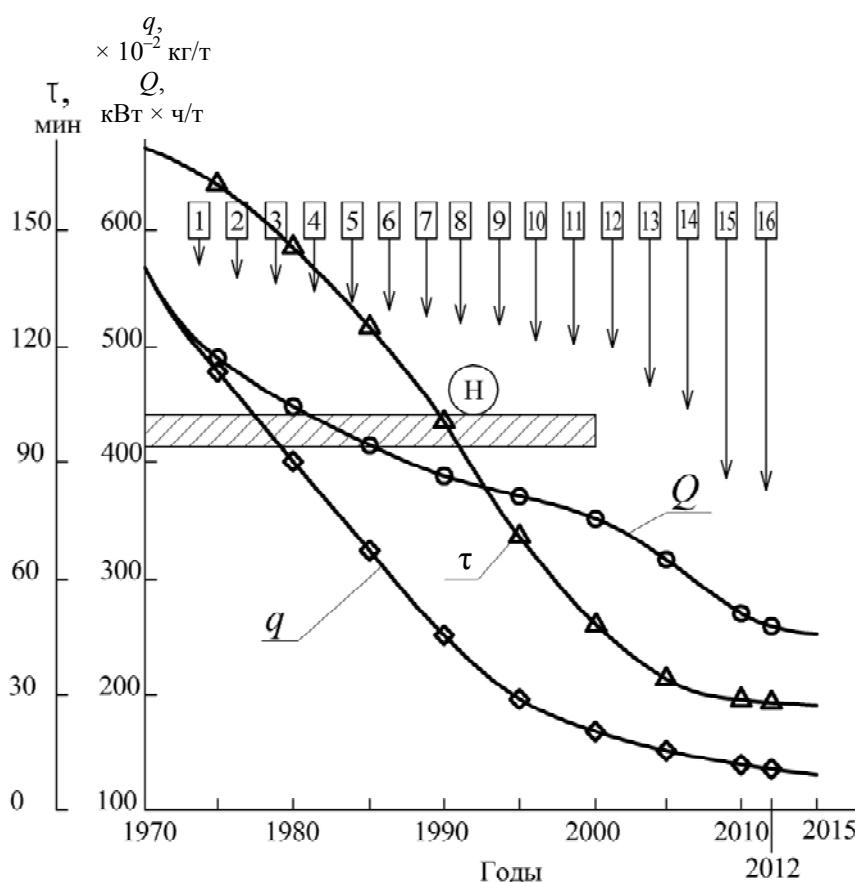


Рис. 1. Влияние методов интенсификации на основные технико-экономические параметры выплавки стали в электродуговых печах:
 τ – продолжительность плавки; q – удельный расход электродов; Q – удельный расход электроэнергии; H – суммарная энтальпия жидких стали и шлака, кВт; 1–16 – методы интенсификации, соответственно: применение кислорода; жидкая завалка; внепечная обработка; водоохлаждаемые панели; повышение мощности трансформаторов (сверхмощные печи); компьютеризация (АСУ ТП); вспененные шлаки; газокислородные горелки; донный выпуск; печь-ковш; эркерный выпуск; подогрев скрапа (сушка); фурмы-манипуляторы; донная продувка; высокотемпературный подогрев шихты; комплексные плавильные агрегаты с непрерывным подогревом шихты

Технологическая привлекательность подогрева шихты как способа улучшения технико-экономических параметров электроплавки заключается еще и в том, что он не требует изменений в технологии.

Подогрев шихты для электропечей – средство универсальное, он актуален как для крупных металлургических печей, в том числе сверхмощных, несмотря на их высокую удельную мощность и интенсивность процесса плавки, так и для небольших по емкости плавильных агрегатов литейных цехов. Подогрев шихты эффективен не только для электродуговой плавки чугуна и стали, но также и для индукционных тигельных печей, применяемых для выплавки черных и цветных сплавов [1], [2].

Экономия электроэнергии при использовании подогрева шихты определяется не только количеством тепла (величиной энтальпии), вносимого в печь с горячей шихтой, но и соотношением коэффициентов теплоиспользования (КПД).

Термический КПД ЭДП равен примерно $\eta \approx 0,6$, изменяясь по ходу плавки от 0,4 при нагреве шихты до 0,8 при нагреве жидкой ванны. КПД установок ВПШ оптимальной конструкции достигает 0,80–0,85, при этом в начальный период работы при холодной шихте η достигает 0,95.

На рис. 2 представлены сопоставимые данные по затратам энергии в установках ВПШ, работающих на природном газе с теплотворной способностью $q = 35000 \text{ кДж/м}^3$, и ЭДП. Еще более очевидным становится экономический эффект ВПШ при использовании стоимостных показателей: стоимость 1 кВт · ч электроэнергии в Республике Беларусь равна ~ 1115 р. (в ценах 2012 г. для промпредприятий), а такое же количество тепловой энергии, полученной от сжигания природного газа, – около 250 р., что дает соотношение затрат на получение 1 кВт · ч энергии 1 : 4,55 (при 100%-м переходе электроэнергии в тепловую).

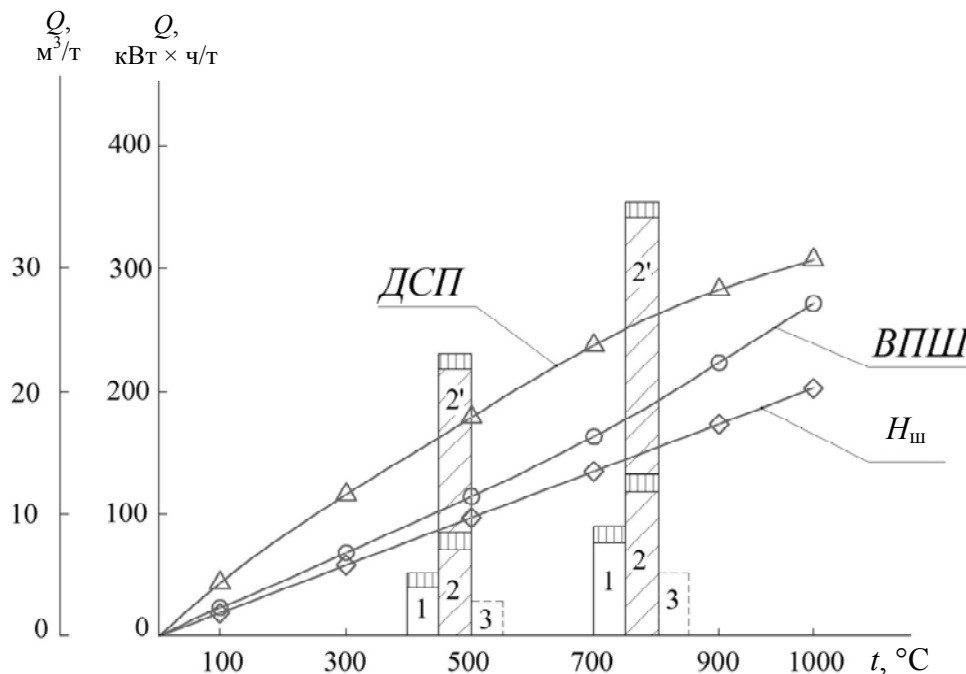


Рис. 2. Затраты энергоснабжателей на нагрев шихты: 1) в натуральном выражении: ВПШ – природного газа в установках высокотемпературного подогрева шихты в бадах; ДСП – электроэнергии в дуговых печах; $H_{ш}$ – энтальпия шихты (энергия, накопленная шихтой); 2) в стоимостном выражении: 1 – затраты на природный газ; 2 – затраты на электроэнергию, при соотношении стоимости «природный газ/электроэнергия» – 1/1; 2' – затраты на электроэнергию при соотношении 1/3; 3 – приведенные энергозатраты при использовании отходящих газов

Для полной оценки экономического эффекта необходимо, конечно, учитывать и сокращение времени плавки (до 30 % периода расплавления шихты), расхода электродов (стоимость электродов диаметром 600 мм ~ 47400 р./кг), кислорода (~ 1920 р./м³) и футеровки. В ряде работ выделяется в качестве основной составляющей экономического эффекта снижение себестоимости шихты за счет увеличения доли низкачественного скрапа пропорционально температуре предварительного подогрева [3], [4].

Еще более привлекательным выглядит способ подогрева шихты за счет вторичных энергоресурсов электродуговой плавки, которыми в данном случае могут служить отходящие из ЭДП газы (рис. 2).

В соответствии с тепловым балансом современных печей (лучший вариант) при суммарном расходе тепла 640–660 кВт · ч/т, из которого на долю электроэнергии приходится 340–360 кВт · ч/т, а остальное – тепло от экзотермических реакций, сжигания дополнительного топлива и угара электродов, потери тепла с отходящими газами составляют 143–205 кВт · ч/т (22–32 %). Этого тепла достаточно для нагрева скрапа до 700 °С и более. Если учесть, что в литейных цехах, где используются печи небольшой мощности (3–20 т/ч), удельные затраты электроэнергии достигают 700–750 кВт · ч/т, потери тепла с отходящими газами достигают 400–440 кВт · ч/т, соответственно, резерв тепловой энергии для использования в ВПШ становится еще больше [5].

Конечно, соотношение стоимости тепловой энергии, полученной от различных энергоносителей в разных странах, различное. В США соотношение газ – электроэнергия равно примерно 1 : 6, Украине 1 : 2, в РФ в зависимости от региона – от 1 : 5 до 1 : 12. Эти соотношения меняются также от года к году, что определяется многими зачастую даже не экономическими факторами, а конъюнктурой. Однако нетрудно подсчитать, что при соотношении 1 : 3 достаточно обеспечить КПД установки ВПШ на уровне ~ 25 %, чтобы получить уже значимый экономический эффект за счет сокращения расхода электроэнергии в ЭДП, электродов, футеровки, эксплуатационных расходов и повышения производительности печей.

Оптимально спроектированные установки обеспечивают средний за период нагрева КПД > (70–75) %, что гарантирует их быструю окупаемость даже при соотношении цен 1 : 2.

Эти критерии пригодны для оценки применимости предварительного нагрева шихты для любых типов электропечей. Если учесть, что тигельные индукционные печи промышленной частоты (ИЧТ) имеют КПД на этапе нагрева шихты 30–35 %, средней частоты ~ 50–60 %, дуговые ДЧМ ~ 45–50 %, ДППТ ~ 55–65 % и т. д. [6], то перспективность предварительного подогрева шихты очевидна.

Исходя из приведенных данных, следует вывод о том, что чем выше температура подогрева шихты, тем выше получаемый эффект энергосбережения и, соответственно, экономический.

Однако ряд специалистов с осторожностью относятся к данному положению и считает, что оптимальная температура нагрева располагается в диапазоне 450–480 °С, а сама зависимость экономического эффекта от температуры носит экстремальный характер, что графически представлено на часто цитируемом графике [7]. Соответствующее уравнение регрессии для удельной экономии электроэнергии представлено в работе [8] следующим выражением: $\Delta = -0,0012T^2 - 1,096T - 161,6$ (кВт · ч/т). Эта зависимость объясняется потерями тепла на восстановление оксидов, которые образовались при ВПШ.

С нашей точки зрения, какие-либо дополнительные потери не достигают сколь-либо значимой величины, если рассматривать процесс в комплексе: ВПШ – ЭДП. Известно, что угар металла в дуговых печах, особенно в зоне дуги и при использовании тонколи-

стового скрапа (плотность шихты $\rho < 2$) достигает 6–7 % и более, в отдельных плавках – 10 %). Практика показала, что суммарный угар в системе «ВПШ – ЭДП» существенно ниже: не более 4–5 %. Это объясняется тем, что в ВПШ нагрев ведется с большей скоростью и реакции окисления при $t > 550\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ не могут достичь равновесия. Кроме того, образующаяся пленка оксидов достаточно плотная и препятствует диффузии кислорода. Угар при ВПШ не превышает, как правило, 0,5 %. В то же время стадия активного окисления в ЭДП сокращается на 25–30 %. Этим, в частности, объясняется возможность увеличения доли в шихте низкосортного тонколистового скрапа при использовании предварительного подогрева [3], [9].

Установки и системы подогрева шихты

Энергетический кризис 80-х гг. и постоянный рост стоимости энергоресурсов вызвали необходимость обратить особое внимание на ВПШ как действенное средство ресурсосбережения.

Интенсивные исследовательские и конструкторские работы по сокращению удельных затрат электроэнергии при плавке привели к созданию различных систем подогрева шихты, которые можно объединить в следующие группы (с указанием фирм-разработчиков) [4], [10]–[12]:

- системы подогрева шихты в бадьях – Bucket Scrap Preheating Systems (Daido, NKK, Krupp, SMS-Demag, Siemens-VAI, Danarc, Danieli);
- вращающиеся нагревательные печи – Rotary Kiln Preheater (Fuel Arc Furnace, BBS-Brusa);
- шахтные печи – с одной или сдвоенной шахтой с удерживающими пальцами – Shaft Furnaces – Single, Double and Finger Shafts (Siemens-VAI);
- шахтно-дуговые печи – EcoArc Shaft Furnace (NKK);
- шахтные печи с толкателями – Shaft Furnace with pusher (IHI);
- шахтно-дуговые с перемещаемым подогревателем – COSS (Continuous Optimized Shaft System) Shaft Furnace (Fuchs);
- подогреватели непрерывного действия (подогрев шихты на конвейере) – Continuous Scrap Preheating System (Tenova Consteel Process, Danieli ESC System);
- сдвоенные (двухкорпусные) печи – Twin Shell Furnace;
- бадьевые высококорпусные печи – Single Bucket High Shell Furnace.

Можно заметить, что в металлургии усилия были направлены в основном на создание комбинированных комплексных агрегатов, включающих помимо собственно ДСП сопряженную с ней установку, в которой за счет тепла отходящих газов подогревается шихта до максимально возможных температур.

Наиболее удачной по компактности, технологичности и эффективности зарекомендовала себя последняя разработка фирмы «Fuchs Systemtechnik AG»: дуговая печь с устройством для подогрева шихты «COSS» и боковой загрузкой (рис. 4). Шихта загружается в «COSS», где нагревается до $650\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$ печными газами, поступающими с температурой $750\text{--}1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Загрузка горячей шихты в печи осуществляется 5–6 раз в час порциями примерно по 20 т. Фактически процесс плавки идет непрерывно с периодическими выпусками жидкого металла по 100–120 т [10].

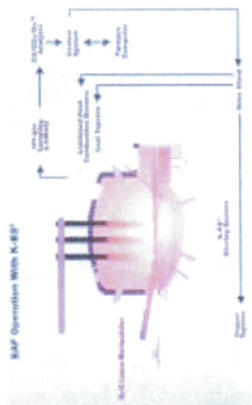
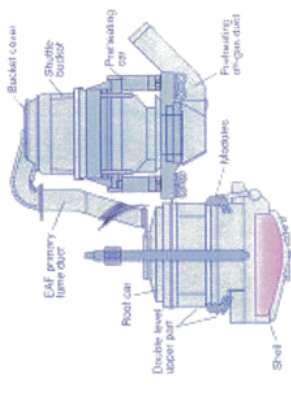
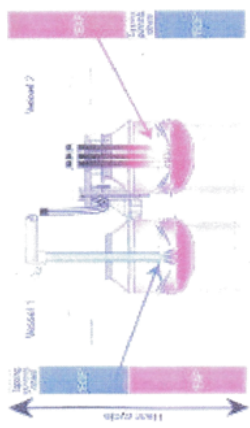
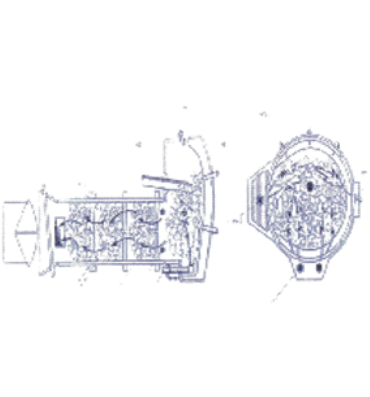
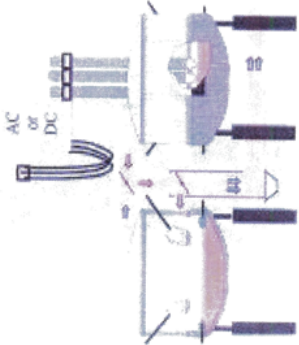
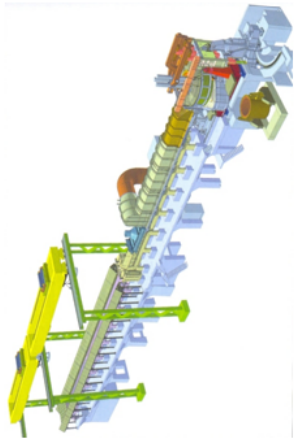
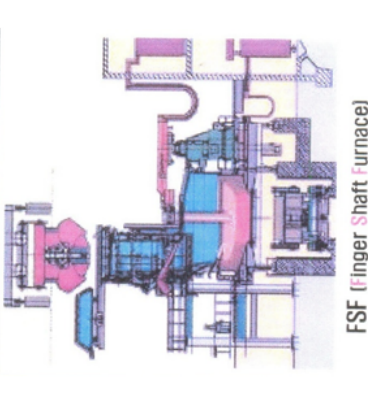
KES [Klockner Electric Steel process]	DANARC [DANieli electric ARC]	CONARC [CONverter – ARC furnace]	FAF [Fuel Arc Furnace]
			
TWIN	Consteel		Shaft Furnace
			

Рис. 3. Комбинированные электродуговые установки (ЭДП–ВПП)

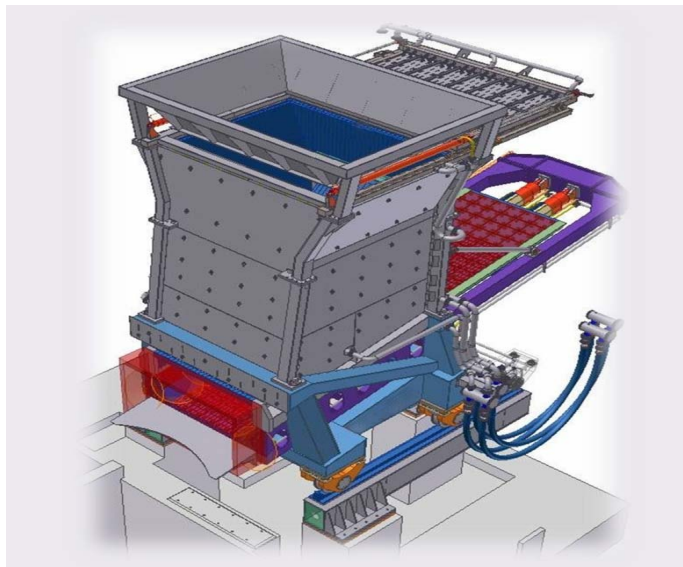


Рис. 4. Шахта «COSS» для подогрева и порционной загрузки шихты

При минимальном расходе электродов 1,3 кг/т и вдувании углеродосодержащих материалов в пределах 12,6–13,5 кг/т расход электроэнергии составляет около $260 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ при выплавке углеродистой стали.

Нагрев шихты в слое за счет продувки его газами является наиболее эффективным способом теплопередачи, что, в частности, объясняет компактность и высокий КПД установок, работа которых основана на этом принципе: установки ВПШ в завалочных бадьях, установки шахтного типа, в том числе COSS, и др.

При этом наиболее простыми и надежными в обслуживании и эксплуатации являются автономные установки с газовым подогревом шихты. Наиболее экономичными, но существенно более сложными и дорогими являются установки подогрева шихты, использующие тепло дымовых газов (ВЭР). Использование ВЭР вызывает проблемы, связанные с синхронизацией работы печи и установки подогрева, а также необходимостью проведения дополнительных мероприятий, направленных на повышение стабильности и эффективности работы системы пылегазоочистки. Последнее особенно актуально при использовании загрязненной низкосортной шихты, что, к сожалению, становится все более распространенным явлением.

В слое нагреваемой шихты газы, отходящие из ДСП, дополнительно насыщаются продуктами испарения и деструкции органических соединений, аэрозолями и частицами синтетических материалов (масла, краски, пластмасса и т. п.). Высокодисперсные органические вещества и сажистый углерод, осаждаясь на фильтрах и накапливаясь в слое уловленной аспирационной пыли, способны к интенсивному окислению и разогреву, что может привести к возгоранию в газоходах и тканевых фильтрах.

Эта проблема характерна для всех подобных систем, работающих на печных газах, и имеет общее решение: дожигание газов на выходе из слоя шихтовых материалов с последующим охлаждением и/или разбавлением перед входом в фильтр. Одним из вариантов такого решения является поджигание дымовых газов на выходе из слоя шихты за счет подвода горячих газов с температурой выше 750°C непосредственно из рабочего пространства печи (минуя шахту или COSS), в количестве 0,1–0,3 от общего объема отходящих газов. Более простым и надежным решением является установка горелок – запальников, работающих на природном газе. Естественно в камеру дожигания должен подаваться воздух для горения СО и органических примесей в стехиометрических соотношениях.

В установках ВПШ, где нагрев осуществляется отходящими газами, проходящими по тоннелям (камерам) над шихтой («Consteel» и др.), дожигание СО и органики осуществляется непосредственно по тракту движения шихты в свободном пространстве над ее поверхностью. Выделяющееся тепло служит дополнительным источником энергии. Подобные установки обеспечивают высокую температуру нагрева, но имеют большие габариты (протяженность), значительные тепловые потери и, соответственно, более низкий, чем шахтные печи, КПД [11], [12].

На рис. 3 представлены некоторые из известных установок комбинированного типа, освоенных в последние годы рядом металлургических фирм. Нетрудно заметить, что эти установки отличаются от традиционных ДСП значительно большими габаритами, более сложными устройствами загрузки шихты, более «жестким» технологическим режимом, что требует и более сложной системы контроля и управления. Важным фактором является также колебание температуры и состава газов на выходе из ДСП по ходу плавки, и, соответственно, переменные условия нагрева шихты и возможности дожигания СО и органики. Существенно меняется организация завалки, что требует или увеличения высоты уровня загрузки шихты (в установках шахтного типа), или протяженности загрузочных конвейеров (в установках типа «Consteel»).

Во вновь строящихся цехах это не вызывает особых сложностей, но при реконструкции действующих цехов и замене традиционных агрегатов это требует тщательной проектной проработки, дополнительных капвложений, а зачастую вообще невозможно.

Подогрев шихты в загрузочных бадьях

Альтернативой, особенно для действующих производств, является подогрев шихты в бадьях. При этом могут рассматриваться варианты нагрева как за счет тепла отходящих газов, так и за счет использования дополнительного топлива – преимущественно природного газа [13].

Кажущаяся простота решения задачи экономии электроэнергии и утилизации ВЭР с минимальными капитальными затратами при подогреве шихты непосредственно в загрузочных бадьях стимулировала активную разработку таких систем во второй половине прошлого века. Уже в 50-х гг. несколько фирм в Японии и Европе начали использование установок предварительного подогрева шихты в бадьях. За 70–80-е гг. только в Японии было создано более 50 таких установок.

На рис. 5 представлена одна из установок такого типа фирмы Washington Steel Corp., Houston (США) [3].

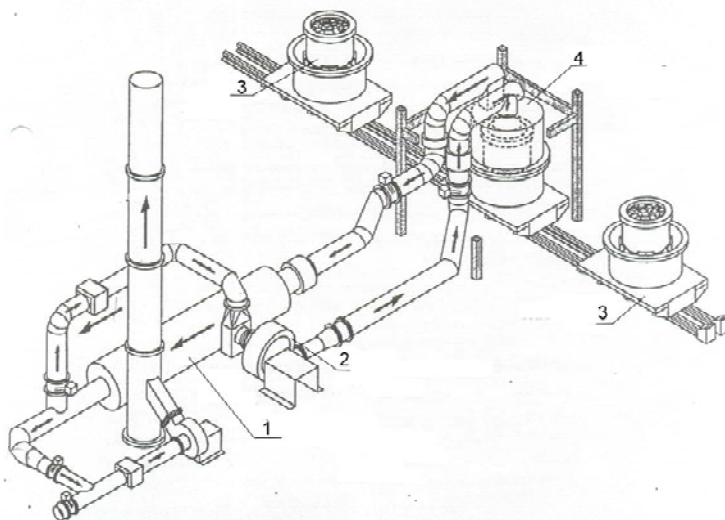


Рис. 5. Схема установки Washington Steel Corp. для подогрева шихты в загрузочной бадье:
1 – рекуператор; 2 – вентилятор; 3 – позиции ожидания; 4 – камера подогрева

Отходящие из ДСП газы проходят через слой шихты в бадье, откуда направляются в камеру дожигания – рекуператор, после чего разделяются на два потока: часть выбрасывается в атмосферу, часть снова направляется в бадью. Сама бадья находится в камере с теплоизолированными стенками (рис. 6).

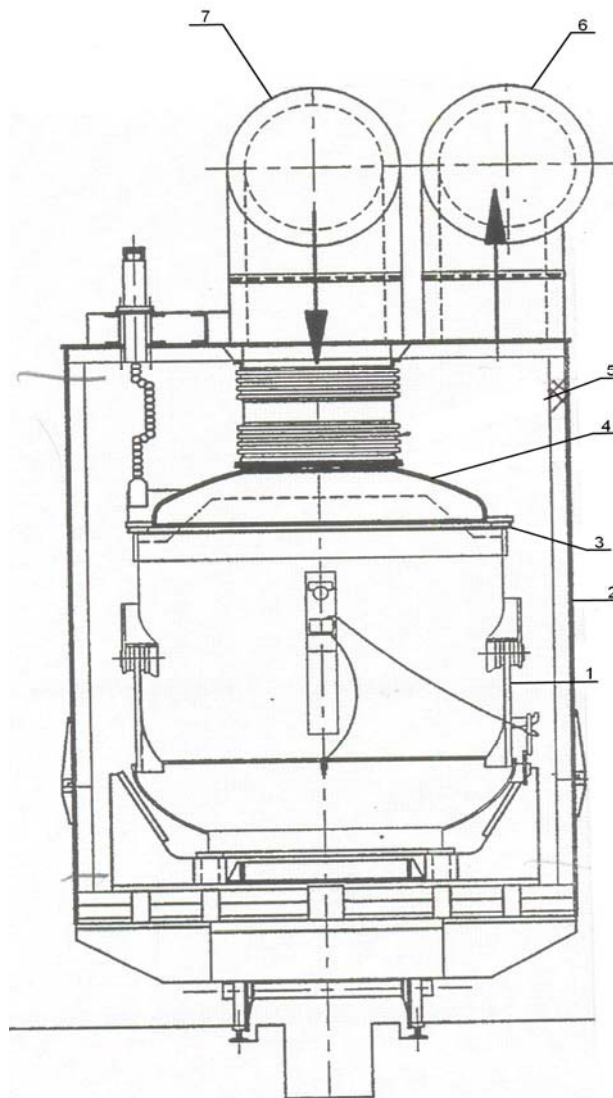


Рис. 6. Бадья в теплоизолированном корпусе камеры подогрева:
1 – бадья с шихтой; 2 – корпус камеры подогрева; 3 – затвор; 4 – свод-крышка;
5 – теплоизоляция; 6 – отвод дымовых газов; 7 – ввод дымовых газов в бадью

Интересно, что подобное (и как будет ниже показано, ошибочное) конструктивное решение было использовано в целом ряде подобных установок. Достаточно привести пример установки (рис. 7), которую в свое время пытались применить на Минском тракторном заводе, с той лишь разницей, что на РУП «МТЗ» нагрев осуществлялся за счет сжигания природного газа.

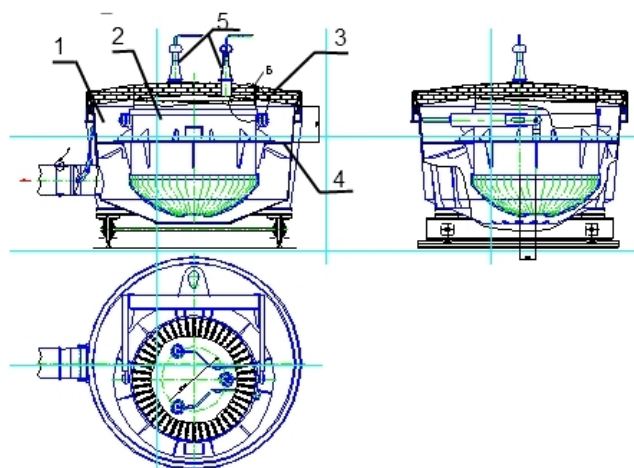


Рис. 7. Первоначальный вариант установки подогрева шихты на РУП «МТЗ»:
1 – корпус; 2 – бадья; 3 – свод; 4 – опорное кольцо; 5 – инжекционные горелки

Сложная система с двумя ступенями нагрева бадей, выполненных из жаростойкой стали, двумя вентиляторами, разделением потоков и циркуляцией газов, в некоторой степени напоминающая установки Washington Steel Corp., была использована на установках подогрева шихты для 30-тонных индукционных печей на Заводе литья и нормалей (г. Гомель), выполненных по проекту института ГИПРОТСХМ (г. Харьков). После доработки этой системы специалистами ГГТУ им. П. О. Сухого, в частности, перевода ее в режим «под разряжением», ликвидации перетоков (встречных потоков газов) и оснащения ее аппаратами очистки, она была введена в эксплуатацию и работает по настоящее время (рис. 8) [14]. Можно отметить, что корпус бадьи здесь не изолирован от окружающей среды.

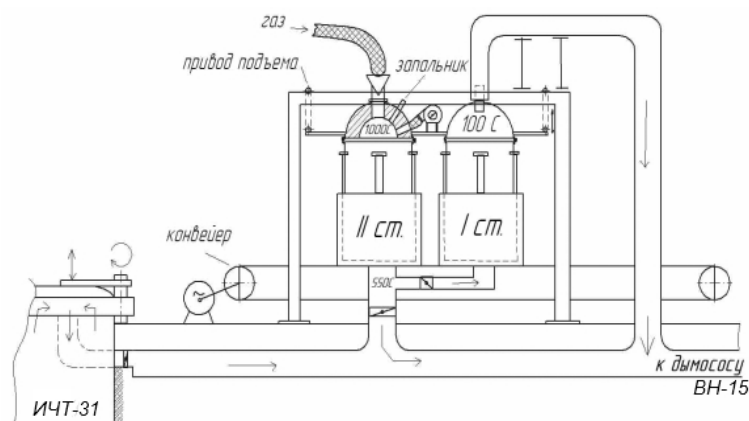


Рис. 8. Схема двухступенчатой системы подогрева шихты в бадьях (ЗЛиН, г. Гомель)

Однако нагрев в загрузочных бадьях имеет наряду с привлекательной простотой очевидный недостаток: невозможно нагреть шихту, не нагревая в то же время корпус бадьи. Причем температура нагрева самой бадьи в представленных выше установках выше, чем шихты. Сопротивление вдоль корпуса бадьи для потока газов меньше, чем сквозь слой шихты в центральной части слоя, соответственно, больше скорость и конвективный теплообмен.

Нагревать бадью – грузонесущее оборудование выше 350 °С опасно. Отсюда ограничение по температуре нагрева шихты и недостаточная эффективность представленных выше схем подогрева.

С другой стороны, при температурах около 250–350 °С практически осуществляется лишь сушка и частичная очистка (продувка) шихты, что является положительным фактором, повышающим безопасность плавки, особенно в холодное время года, так как предотвращает выбросы из плавильной печи из-за попаданий влаги и льда с шихтой. Именно такую задачу решают подобные установки на ряде заводов (рис. 9). Однако о заметном экономическом эффекте при этом говорить не приходится.

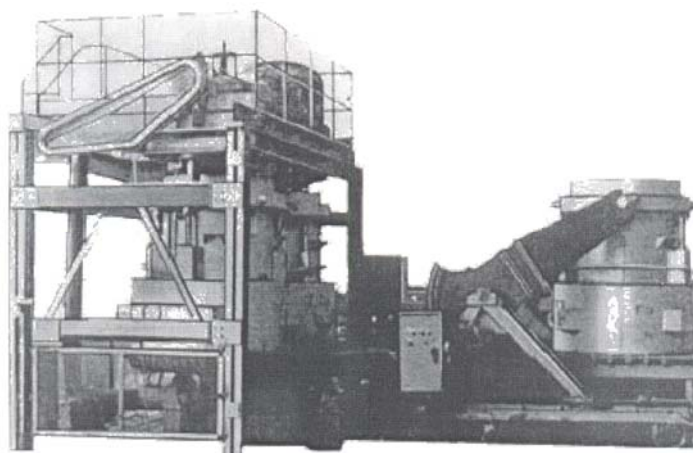


Рис. 9. Установка сушки шихты

Экономия электроэнергии в 35–45 кВт · ч/т является недостаточным стимулом для дополнительных затрат на эксплуатацию и обслуживание таких установок. Попытки улучшить процесс за счет применения бадей из жаропрочной стали, футеровка бадей и т. п. не привели к существенному повышению эффективности, но вызвали значительное удорожание установок и снижение рентабельности.

Использование для подогрева шихты в бадьях отходящих печных газов создает дополнительные трудности из-за нестабильности режимов работы печи, колебаний температуры и расходов газов (рис. 10). На входе в бадью параметры газового потока необходимо стабилизировать по температуре во избежание перегрева и коробления корпуса, а при понижении температуры отходящих газов включать газовые горелки для интенсификации подогрева шихты

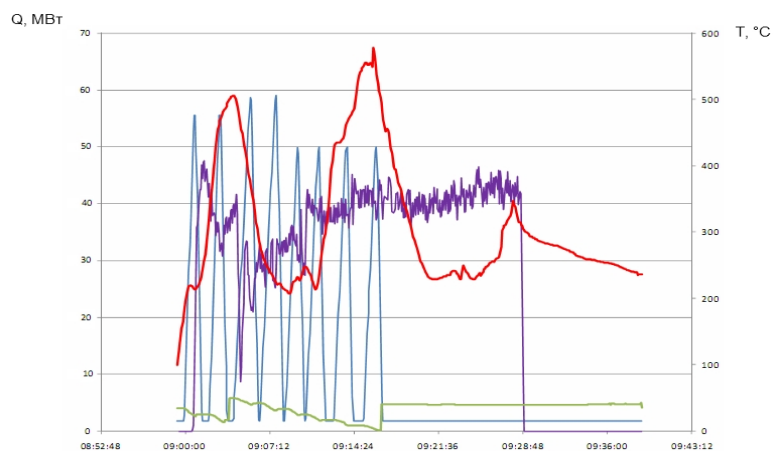
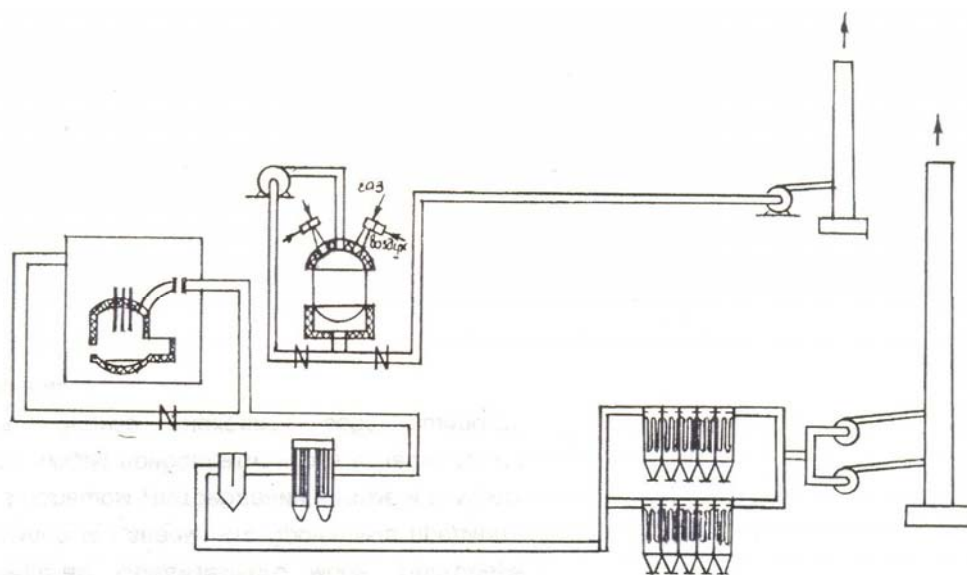
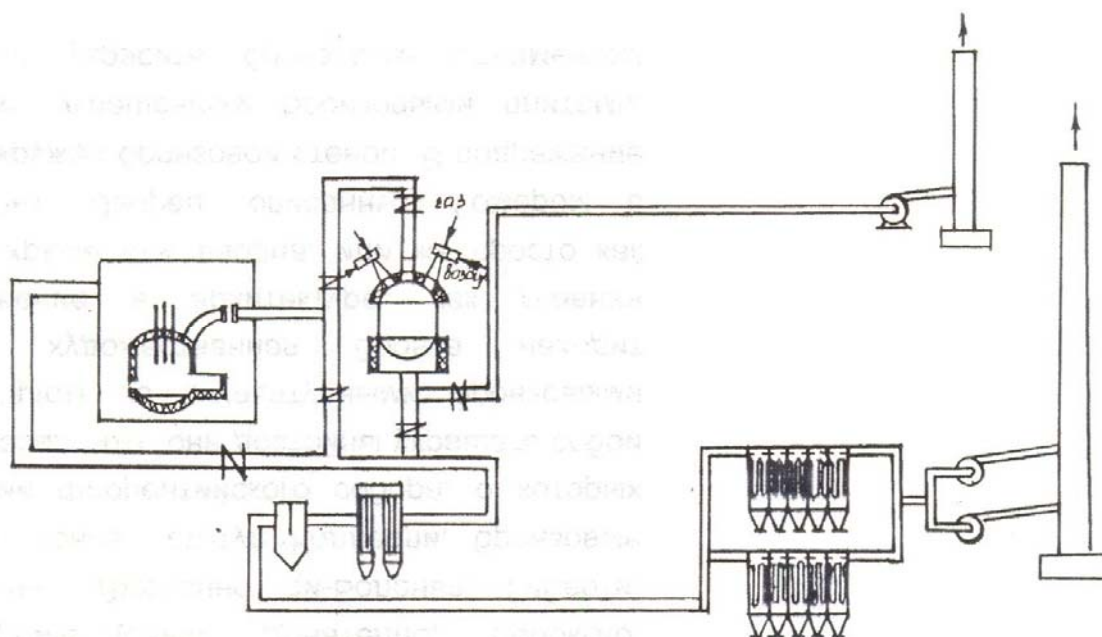


Рис. 10. Изменения температурного режима по ходу плавки
(координаты: потребляемая мощность – время):

1 – загрузка очередной порции 20 т; 2 – потребляемая мощность; 3 – температура отходящих газов; 4 – масса шихты в шахте подогревателя



а)



б)

Рис. 11. Системы подогрева шихты в бадах:
а – автономная; б – за счет тепла отходящих печных газов

Значительно усложняется система аспирации и очистки отходящих газов (рис. 11).

Все это привело к тому, что способ подогрева шихты в бадах в 90-е гг. в значительной степени утратил в глазах металлургов свою привлекательность.

В начале 2000-х гг. сотрудниками ГГТУ им. П. О. Сухого и УП «Технолит» после достаточно длительных поисковых работ было найдено простое решение, позволяющее осуществить высокотемпературный подогрев шихты в малозатратной установке, легко адаптирующейся к действующему плавильному оборудованию.

Сущность технического решения заключается в применении специальной «бады-термоса» [14]. При этом изготовить такую бадью можно простой доработкой тради-

ционных загрузочных бадей (корзин). Для этого в обычную загрузочную бадью (корзину) из конструкционной стали концентрически устанавливается вставка. Эта вставка позволяет разделить функции, выполняемые бадьей: грузонесущую – выполняет корпус, а роль ограждающей тепловой стенки (экрана) играет вставка, не испытывающая серьезных механических нагрузок. Установки ВПШ на основе «бадьи-термоса» успешно внедрены в Республике Беларусь и Украине, обеспечив нагрев шихты до 650–750 °С. При оптимальной конструкции ее эффективность соответствует лучшим вариантам современных комбинированных установок ЭДП–ВПШ.

Заключение

Высокотемпературный предварительный подогрев шихты при электроплавке является эффективным средством интенсификации плавки, сокращения затрат электроэнергии и материалов, повышения безопасности и улучшения экономических и экологических параметров плавки.

При этом можно выделить два наиболее перспективных направления. Во вновь строящихся цехах предпочтительнее использовать электродуговые печи с встроенными боковыми установками шахтного типа (ЭДП–ВПШ), обеспечивающими нагрев шихты до 700–800 °С и снижение удельных затрат электроэнергии до 260–280 кВт · ч/т. При доработке систем обезвреживания эти агрегаты могут служить хорошей альтернативой современным ДСП.

Оптимальным решением для действующих цехов может служить автономный подогрев шихты в бадьях нового типа, обеспечивающих высокотемпературный нагрев шихты.

Внедрение установок ВПШ в литейном производстве и металлургии является перспективным средством ресурсосбережения при плавке черных и цветных металлов.

Литература

1. Найдек, В. Л. Интенсификация электроплавильных процессов / В. Л. Найдек, А. А. Костяков, А. А. Волошин // *Соврем. электрометаллургия*. – 2009. – № 2.
2. Ткаченко, С. С. Проблемы модернизации литейного производства станкостроения / С. С. Ткаченко, В. С. Кривицкий // *Литейное пр-во*. – 2012. – № 5.
3. Technoeconomic Assessment of Electricity Steelmaking Through the Year 2000. EPRI Report. EM-5445.
4. Fontana, A. EAF Scrap Preheating Technologies. – Victoria, Australia / High Temp. Pr. Symposium, 2012.
5. Смирнова, Е. Ю. Использование тепла отходящих газов ДСП для подогрева шихты // Е. Ю. Смирнова // *Электрометаллургия*. – 2003. – № 10.
6. Пути снижения расхода энергетических ресурсов в литейном производстве. – М. : Металлург, 2001.
7. Супрун, В. Н. Подогрев лома / В. Н. Супрун // *Рынок вторичных материалов*. – 2003. – № 3.
8. Стеблов, А. Б. Пути снижения затрат при выплавке стали // А. Б. Стеблов, А. В. Мажейко, Э. А. Стеблова // *Металлург*. – 2006. – № 11.
9. Schmitt, R. Y. Electric Arc Furnace Scrap Preheating. CMP, Pittsburgh, 1997.
10. Шахтно-дуговые печи / Г. Фукс [и др.] // *Электрометаллургия*. – 2000. – № 8.
11. Райле, В. Т. Совершенствование работы шахтных подогревателей второго поколения / В. Т. Райле, В. Е. Рошин // *Вестн. ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2010. – Вып. 14. – № 13.

12. K. Rummler, A. Tunaboyl, Scrap Preheating and Continuous Charging System. MPT Int. – 2011. – № 5.
13. Лопухин, Г. А. Состояние и тенденции развития электросталеплавильного производства / Г. А. Лопухин // Электрометаллургия. – 2000. – № 7.
14. Установки подогрева шихты для электроплавки / С. Л. Ровин [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – № 2.

Получено 04.10.2013 г.

УДК 624.131.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОДИНОЧНОЙ ВИНТОВОЙ СВАИ С УЧЕТОМ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА

Д. В. ПРОКОПЕНКО

*Учреждение образования «Гомельский государственный
университет имени Ф. Скорины», Республика Беларусь*

Введение

Одной из проблем удешевления жилья является задача разработки и внедрения рациональных конструкций фундаментов зданий. При определенных свойствах грунтового основания и способе устройства фундамента здания экономически целесообразным может оказаться фундамент на основе винтовых свай. Такой фундамент и грунтовое основание образуют сложную нелинейную систему деформируемых твердых тел. При завинчивании сваи в грунтовое основание происходит уплотнение грунта вокруг ствола с постепенным убыванием до его первоначального состояния. Неучет этой особенности приводит к недоиспользованию несущей способности грунтового основания и, как следствие, к повышению стоимости фундамента возводимого здания.

Постановка задачи

Рассматривается винтовая свая в нелинейно-деформируемом грунтовом основании. На винтовую сваю действует нормальная равномерно распределенная внешняя нагрузка. Необходимо исследовать несущую способность грунтового основания винтовой сваи с учетом уплотнения грунта вокруг ствола сваи.

Решение этой задачи проводилось посредством специальных натурных экспериментов, выполненных в БЕЛНИИС (г. Минск).

В настоящей работе винтовая свая и грунтовое основание рассматриваются как единая нелинейная физическая система. Для исследования указанной нелинейной физической системы используются методы математического и компьютерного объектно-ориентированного моделирования на основе метода конечных элементов и метода энергетической линеаризации [1], [2].

Математическая модель системы

Ядро математической модели будем строить на основе принципа минимума полной энергии системы. Для краевых задач нелинейной механики грунтов математическая модель исследуемой физической системы будет иметь вид [1], [2]:

- 1) геометрическая модель деформируемой среды;
- 2) механико-математическая модель элементов системы:
 - при линейно-упругом деформировании: $\sigma_i = E\varepsilon_i$;
 - при нелинейно-упругом деформировании: $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$, в частности

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^m, \quad A > 0, \quad 0 < m < 1,$$

где σ_i, ε_i – интенсивности напряжений и деформаций; E – модуль деформации; A, m – параметры закона нелинейного деформирования;

3) система краевых условий, задается в соответствии с классификацией поставленной задачи как краевой задачи математической физики;

4) условия равновесия системы (ядро математической модели):

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{U\}} = 0,$$

где

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV - \{U\}^T \{P\},$$

где $\Pi, \{P\}$ – полная энергия деформируемой системы и вектор внешних сил; $\{\sigma\}, \{\varepsilon\}, \{U\}$ – векторы напряжений, деформаций и перемещений; V – объем области существования исследуемой системы;

5) математическая модель (форма) искомого решения: $\varphi = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 z$.

Учет уплотнения грунта при математическом моделировании несущей способности грунтового основания винтовой сваи

Уплотнение грунта изменяет значение основных физико-механических характеристик грунта. Следовательно, использование приведенных значений нормативных характеристик грунтового основания без их коррекции при расчете осадки сваи будет неправомерным.

Характер взаимодействия винтовой сваи с грунтовым основанием существенно влияет на величину осадки отдельной сваи и свайного фундамента в целом. При анализе деформационного процесса грунтового основания винтовой сваи можно выделить два этапа: завинчивание сваи и взаимодействие сваи с грунтовым основанием при действии сжимающей нагрузки. При завинчивании сваи происходит смятие грунта и его уплотнение вследствие внедрения тела сваи. При действии на винтовую сваю сжимающей нагрузки образуется деформируемая область. Геометрия уплотнения может быть определена только экспериментально, что очень трудоемко и дорого. Учет уплотнения математическими методами или методом компьютерного моделирования приводит к необходимости принятия некоторой модели структуры и свойств рассматриваемой физической системы [3]. Наиболее эффективными могут быть два подхода: рассмотреть некоторое однородное грунтовое основание эквивалентное по несущей способности исходному уплотненному грунтовому основанию, другим вариантом может быть неоднородно-уплотненное грунтовое основание с изменяющимся модулем деформации.

В обоих случаях необходимо определять физико-механические характеристики грунта в пределах расчетной области. Для этого были разработаны формулы для определения модуля деформации грунтового основания [4].

Для эквивалентного грунтового основания:

$$E_{\text{экв}} = \frac{E_0}{1 - \mu f};$$

$$f = \frac{R_{\text{max}}}{R_{\text{max}} - r_{\text{св}}},$$

где $E_{\text{экв}}$ – модуль деформации для эквивалентного грунтового основания; E_0 – начальный модуль деформации грунтового основания; R_{max} – радиус деформируемой области; $r_{\text{св}}$ – радиус сваи; μ – коэффициент Пуассона.

Для неоднородно-уплотненного грунтового основания:

$$E_i = E_0 \left(\frac{R_{\max}}{r_i} \right)^{\mu f},$$

где E_i – модуль деформации i -й точки деформируемой области грунтового основания; r_i – расстояние от ствола сваи до i -й точки деформируемой области грунтового основания.

В настоящей работе рассмотрены оба подхода.

Компьютерное моделирование несущей способности грунтового основания винтовой сваи

Модельная задача. Железобетонная одиночная свая сечением 0,20 м погружена на 4,1 м в грунтовое основание, на сваю действует вертикальная статическая нагрузка P . Приведенные начальные характеристики грунтового основания: $E = 32$ МПа. Необходимо определить осадку сваи. Уравнение состояния было принято в виде $\sigma_i = A \varepsilon_i^m$. Значения параметров A и m равны: $A = 10$, $m = 0,55$. Размеры расчетной области: 115 × 760 см.

Задача решалась в линейной и в нелинейной постановках.

Результаты вычислений приведены в таблице.

$$\mu = 0,3;$$

$$E_{\text{экв}} = 508 \text{ кг/см}^2 = 50,8 \text{ МПа};$$

$$E_{i1} = 573 \text{ кг/см}^2 = 57,3 \text{ МПа}; E_{i2} = 412 \text{ кг/см}^2 = 41,2 \text{ МПа}; E_{i3} = 344 \text{ кг/см}^2 = 34,4 \text{ МПа}.$$

Осадка винтовой сваи в грунтовом основании при вдавливающей нагрузке

E	$S \backslash P$	10000	15000	17500	20000	22500	25000
—	$S_{\text{оп}}$	1,2	2,4	3	4	5	6,6
E_0	$S_{\text{лин}}$	1,63	2,44	2,84	3,25	3,65	4,1
E_0	$S_{\text{нел}}$	1,88	3,34	4,2	5,18	6,29	7,5
$E_{\text{экв}}$	$S_{\text{лин}}$	1,12	1,69	1,97	2,25	2,53	2,81
$E_{\text{экв}}$	$S_{\text{нел}}$	1,19	2,55	3,29	4,14	5,2	6,47
E_i	$S_{\text{лин}}$	1,18	1,18	2,1	2,37	2,66	2,97
E_i	$S_{\text{нел}}$	1,23	2,7	3,38	4,25	5,24	6,5

Примечание. $S_{\text{лин}}$, $S_{\text{нел}}$ – осадки сваи при линейном и нелинейном деформировании основания соответственно, см.; $S_{\text{оп}}$ – нелинейные осадки сваи, определенные опытным путем, см; P – вдавливающая нагрузка, действующая на сваю, кг.

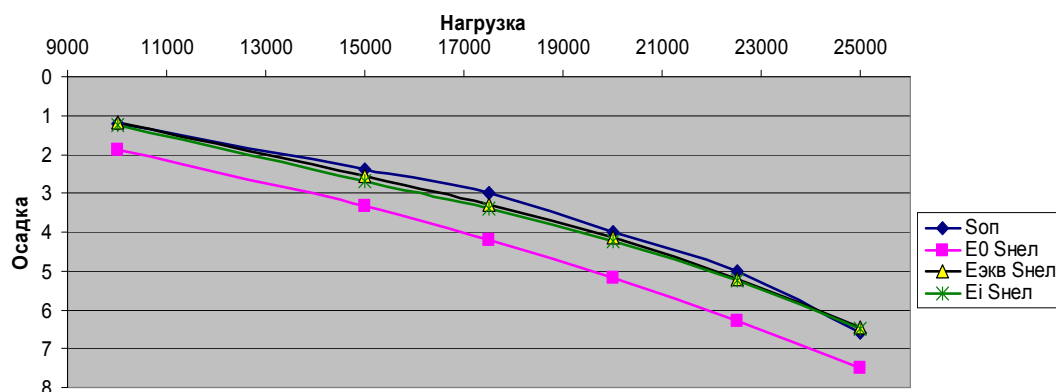


Рис. 1. Осадка винтовой сваи в нелинейно-деформируемом грунтовом основании методами натурального эксперимента и компьютерного моделирования с учетом и без учета уплотнения

Анализ результатов, полученных экспериментально и методом компьютерного моделирования

1. Осадки винтовой сваи для вертикально действующей нагрузки при условии нелинейного деформирования грунтового основания с начальными характеристиками уменьшают несущую способность грунтового основания в среднем на 34 % по сравнению с экспериментальными данными.

2. Осадки винтовой сваи для вертикально действующей нагрузки при условии нелинейного деформирования грунтового основания с эквивалентными характеристиками отличаются в среднем на 5 % от экспериментальных данных.

3. Осадки винтовой сваи для вертикально действующей нагрузки при условии нелинейного деформирования грунтового основания при учете реальной закономерности уплотнения грунта вокруг сваи отличаются в среднем на 8 % от экспериментальных данных.

4. При расчете осадки винтовой сваи в эквивалентном грунтовом основании несущая способность грунтового основания увеличилась в среднем на 29 % по сравнению с осадкой винтовой сваи в грунтовом основании с начальными характеристиками.

5. При расчете осадки винтовой сваи в грунтовом основании с изменяющимися характеристиками несущая способность грунтового основания увеличилась в среднем на 26 % по сравнению с осадкой винтовой сваи в грунтовом основании с начальными характеристиками.

Литература

1. Быховцев, В. Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твердых тел / В. Е. Быховцев. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2007. – 219 с.
2. Быховцев, В. Е. Методология исследования деформаций нелинейных систем твердых тел методом компьютерного объектно-ориентированного моделирования / В. Е. Быховцев, В. В. Бондарева, Д. В. Прокопенко // Материалы юбилей. Респ. науч.-техн. конф. ГГУ. – Гомель, 2009.
3. Быховцев, В. Е. Методология, методы и технология компьютерного объектно-ориентированного моделирования нелинейных систем деформируемых твердых тел / В. Е. Быховцев // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – С. 89–99.
4. Прокопенко, Д. В. Приближенный аналитический метод определения осадки винтовой сваи в нелинейно-деформируемом грунтовом основании с учетом его уплотнения / Д. В. Прокопенко, В. Е. Быховцев // Изв. ГГУ. – 2012. – С. 110–114.

Получено 18.09.2013 г.

УДК 539.375

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

Г. П. ТАРИКОВ

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

В. В. КОМРАКОВ, В. Н. ПАРХОМЕНКО, А. Т. БЕЛЬСКИЙ

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Введение

В настоящее время существует два подхода к определению предельного состояния нагруженного тела. Классические и ряд новых критериев прочности [1]–[3] дают возможность установить предельное состояние материалов в точке. Согласно этим критериям предельная нагрузка для тела будет соответствовать такому случаю, когда предельное состояние материала достигнет во всех точках опасного сечения. В противоположность этому критерии механики разрушения [2]–[4] позволяют найти предельную нагрузку для тела с трещиной, когда критические напряжения имеют место в весьма малом объеме тела.

Целью настоящей работы является рассмотрение нового метода определения предельного состояния элементов конструкции с повреждениями, который основан на совместном использовании критериев прочности материала механики сплошной среды и механики разрушения.

Описание метода

Из экспериментальных данных известно, что в момент разрушения элемента конструкции, имеющего повреждения, предельное напряженное состояние не достигается по всему ослабленному сечению. При некоторой нагрузке возле повреждения в опасном сечении возникает зона предельного состояния (трещина) материала. В этой зоне будет наблюдаться нарушение сплошности материала, что эквивалентно образованию трещины. При дальнейшем росте нагрузки зона предельного состояния будет увеличиваться до тех пор, пока трещина не достигнет критической длины. Затем произойдет практически мгновенное разрушение элемента конструкции или конструкции в целом. За критерий прочности сплошного материала принят критерий статического разрушения пластичных материалов, дополненный условием отрыва:

$$\sigma_i \geq \sigma_B \cup \sigma_1 \geq S_k,$$

где σ_i – интенсивность напряжений; σ_B – предел прочности; σ_1 – главное напряжение; $\cup$ – знак логического суммирования; S_k – истинное сопротивление отрыву.

В качестве условия разрушения используется условие Ирвина:

$$K_1 = K_{1c},$$

где K_1 и K_{1c} – коэффициент интенсивности напряжений (КИН) нормального отрыва и его критическое значение в случае плоского напряженного состояния.

Определение предельного состояния элементов конструкции с повреждениями с использованием предлагаемого метода можно разделить на следующие этапы:

1. Определяется напряженное состояние элемента конструкции (рис. 1, а) и выбирается одно или несколько опасных сечений. Напряженное состояние находится при некотором заданном значении внешних силовых, температурных и других воздействий.
2. Затем эти внешние воздействия увеличиваются пропорционально в одном отношении. При некотором значении внешних воздействий в опасном сечении появляется зона предельного состояния материала.
3. Конструируется функция $g(t)$, которая устанавливает зависимость протяженности зоны предельного состояния материала от величины внешних воздействий.
4. Строится функция $f(t)$, которая определяет зависимость критической длины зоны предельного состояния материала от величины внешних воздействий.
5. Совместно решается численно или графически с помощью ЭВМ уравнение

$$f(t) - g(t) = 0$$

и находится критическое значение внешних воздействий, при котором будет иметь место полное разрушение элемента конструкции.

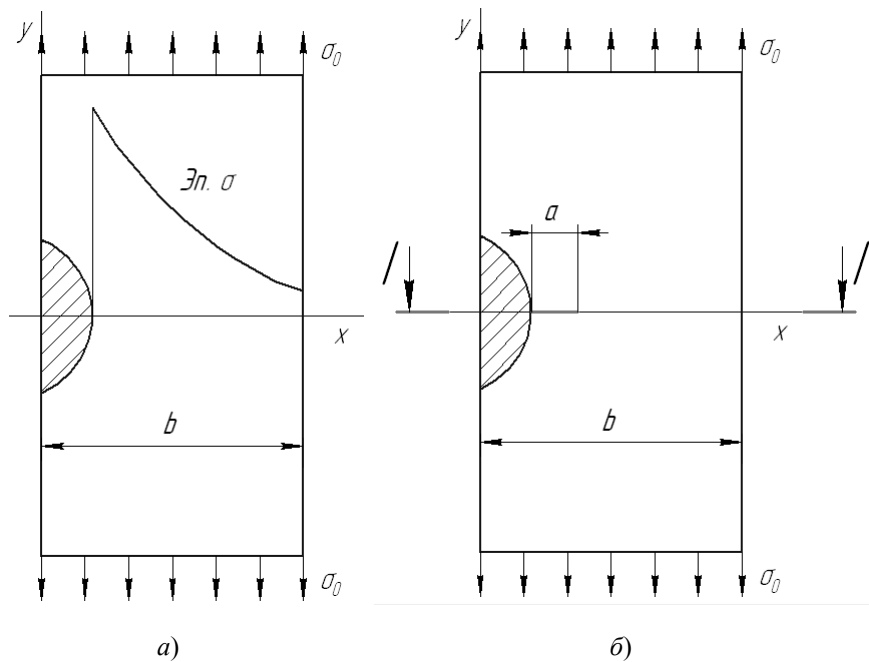


Рис. 1. Стенка трубы: а – без трещины; б – с трещиной

Покажем ход вычислений по предлагаемому методу:

1. Определяем напряженное состояние элемента конструкции с помощью ЭВМ методом конечных элементов при отсутствии трещины. Выбираем опасное сечение (сечение I–I) и напряжение в этом сечении представляем в виде полинома вида:

$$\sigma(x) = \sigma_0 \sum_{n=0}^N \beta_n x^n. \quad (1)$$

Если напряжения σ_x , σ_y , σ_z по величине одного порядка, то в формуле (1) вместо $\sigma(x)$ следует подставлять эквивалентное напряжение по четвертой теории прочности. Если же напряжение σ_y гораздо больше, чем σ_x и σ_z , то можно использовать первую теорию прочности. В результате получим

$$\sigma_0^{\text{np}} \sum_{n=0}^N \alpha_n t^n = \sigma_B. \quad (2)$$

Здесь σ_B – предел прочности материала,

$$x = bt, \quad \alpha_n = \beta_n b^n.$$

Из формулы (2) получаем

$$g(t) = \sigma_0^{\text{np}} = \frac{\sigma_B}{\sum_{n=0}^N \alpha_n t^n}.$$

2. Теперь рассмотрим образец с трещиной (рис. 1, б). В этом случае будем иметь такое выражение для коэффициента интенсивности напряжений:

$$K_1 = \sigma_0 \sqrt{\pi a} F(t), \quad a = bt,$$

где a – длина трещины; $F(t)$ – поправочная функция, учитывающая геометрию конструктивного элемента.

Применяя условие разрушения Ирвина, получаем

$$f(t) = \sigma_0^{\text{np}} = \frac{K_{1c}}{F(t) \sqrt{\pi a}},$$

где K_{1c} – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений.

Решение уравнения

$$f(t) - g(t) = 0$$

можно получить графически (рис. 2) или численно с помощью ЭВМ.

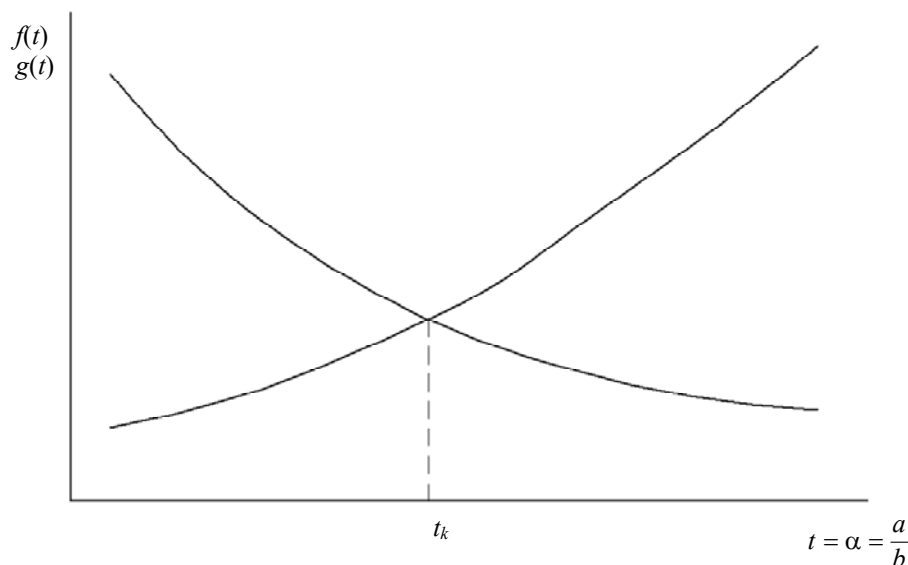


Рис. 2. Решение уравнения $f(t) - g(t) = 0$

Критическая длина трещины будет равна:

$$a_k = bt_k,$$

а предельное напряжение

$$\sigma_0^{\text{пр}} = f(t_k) = g(t_k).$$

Численный пример решения задачи

В рассматриваемом случае (рис. 1, б) опасным будет сечение $I-I$. Строим эпюру напряжений σ_y в этом сечении (рис. 3). По этим данным строим интерполяционный полином

$$\sigma_y(x) = 254,96 - 58,64 \cdot x + 10,35 \cdot x^2 - 0,994 \cdot x^3 + 0,053 \cdot x^4 - 0,0015 \cdot x^5 + 0,0000165 \cdot x^6.$$

Этот полином получен при $\sigma_0 = 100$ МПа. Переделаем его для некоторой величины σ_0 . В результате получим:

$$\sigma_y(x) = \frac{\sigma_0}{100} (254,96 - 58,64 \cdot x + 10,35 \cdot x^2 - 0,994 \cdot x^3 + 0,053 \cdot x^4 - 0,0015 \cdot x^5 + 0,0000165 \cdot x^6).$$

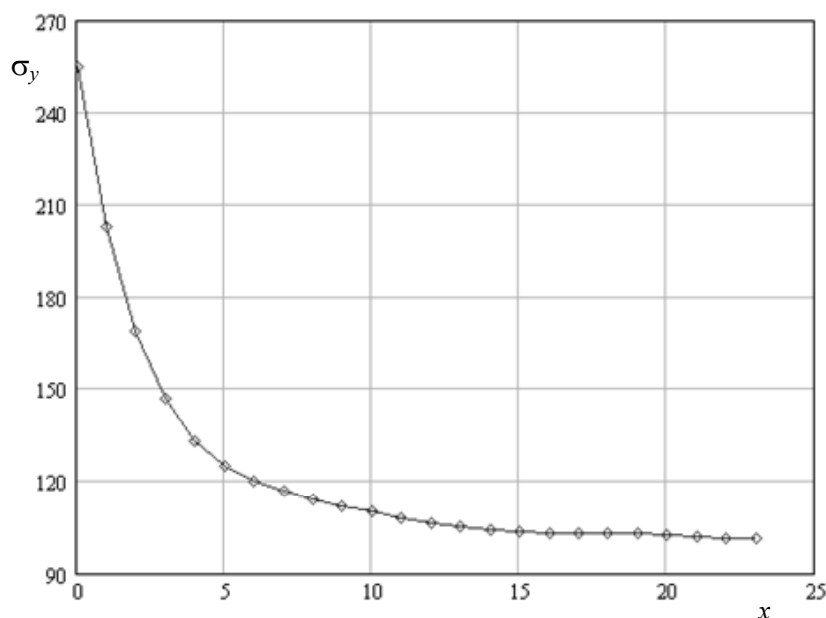


Рис. 3. Эпюра напряжений σ_y в сечении $I-I$

В границах зоны предельного состояния материала выполняется условие $\sigma_y(x) = \sigma_B$. В этом случае приходим к следующему уравнению:

$$\frac{\sigma_0^{\text{пр}}}{100} (254,96 - 58,64 \cdot x + 10,35 \cdot x^2 - 0,994 \cdot x^3 + 0,053 \cdot x^4 - 0,0015 \cdot x^5 + 0,0000165 \cdot x^6) = \sigma_B.$$

Отсюда находим:

$$\sigma_0^{\text{пр}} = \frac{100 \cdot \sigma_B}{254,96 - 58,64 \cdot x + 10,35 \cdot x^2 - 0,994 \cdot x^3 + 0,053 \cdot x^4 - 0,0015 \cdot x^5 + 0,0000165 \cdot x^6} = g(x).$$

Функция $g(x)$ устанавливает зависимость предельного напряжения от величины зоны предельного состояния материала.

Построим функцию $f(a)$, которая показывает зависимость критической длины трещины от величины напряжения σ_0 . Вводим в образец трещину, которой задаем

значение $a = 1, 2, 3, 5$ мм. Определяем коэффициент интенсивности напряжений (КИН) по формуле [5]:

$$K_1 = (2\pi)^{1/2} \frac{(1+\nu)\mu}{4} \lim_{x \rightarrow a-0} \left[\frac{v(x, +0) - v(x, -0)}{(a-x)^{1/2}} \right],$$

где μ – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона; a – длина трещины; v – проекция вектора перемещения на ось y .

Как пример, рассмотрим последовательность вычисления величины K_1 для случая длины трещины равной 5 мм (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные

v , мм	x , мм	y , мм	z , мм
0,21926	89,5	160	3
0,20196	89,5	159,5	3

$$K_1 = (2\pi)^{1/2} \frac{(1+0,33)2,7 \cdot 10^4}{4} \frac{(0,21926 - 0,20196)}{(0,5 \cdot 10^{-3})^{1/2}} = 17,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}.$$

Аналогично можно вычислить величину K_1 для других значений длины трещины. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты вычислений

Длина трещины, мм	1	2	3	5
K_1 , МПа $\cdot$ м ^{1/2}	14,2	16,0	16,9	17,4

График КИН показан на рис. 4.

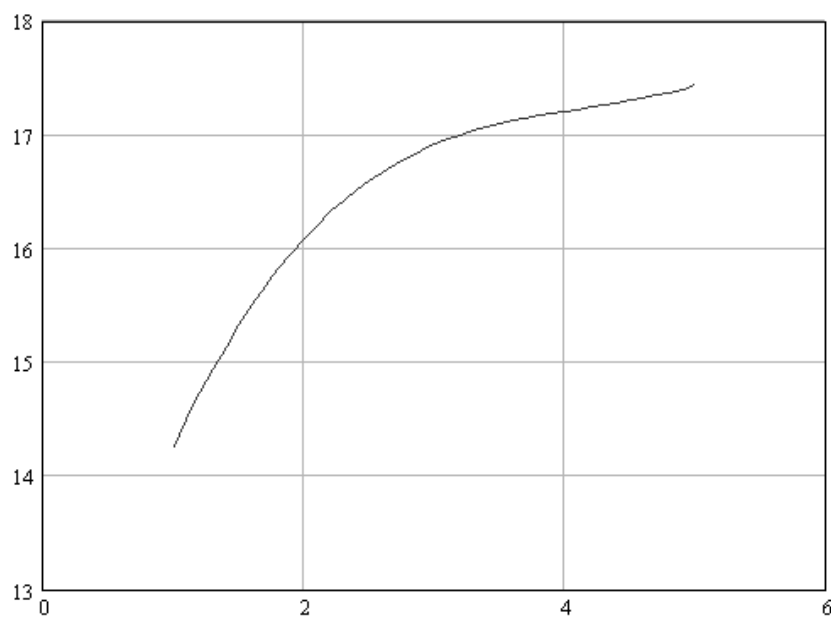


Рис. 4. График КИН

По полученным данным строим интерполяционный полином для КИН

$$K_1 = 10,9505 + 4,202917 \cdot a - 0,974 \cdot a^2 + 0,078583 \cdot a^3.$$

Этот полином получен при $\sigma_0 = 100$ МПа. Переделаем его для некоторой величины σ_0 . В результате получим:

$$K_1 = \frac{\sigma_0}{100} (10,9505 + 4,202917 \cdot a - 0,974 \cdot a^2 + 0,078583 \cdot a^3).$$

Используя условия разрушения Ирвина, имеем:

$$\frac{\sigma_0^{\text{пр}}}{100} (10,9505 + 4,202917 \cdot a - 0,974 \cdot a^2 + 0,078583 \cdot a^3) = K_c.$$

Отсюда получаем

$$\sigma_0^{\text{пр}} = \frac{100 \cdot K_c}{10,9505 + 4,202917 \cdot a - 0,974 \cdot a^2 + 0,078583 \cdot a^3} = f(a).$$

Таким образом, при $\sigma_B = 460$ МПа и $K_c = 36$ МПа $\cdot$ м^{1/2} имеем две функции $g(a)$ и $f(a)$:

$$g(a) = \frac{100 \cdot 460}{254,96 - 58,64 \cdot a + 10,35 \cdot a^2 - 0,994 \cdot a^3 + 0,053 \cdot a^4 - 0,0015 \cdot a^5 + 0,0000165 \cdot a^6};$$

$$f(a) = \frac{100 \cdot 36}{10,9505 + 4,202917 \cdot a - 0,974 \cdot a^2 + 0,078583 \cdot a^3}.$$

Затем необходимо решить уравнение

$$f(a) - g(a) = 0.$$

Решение этого уравнения удобнее выполнить графически (рис. 5). В результате находим $a_k = 1,359$ мм; $\sigma_k = 239,5$ МПа.

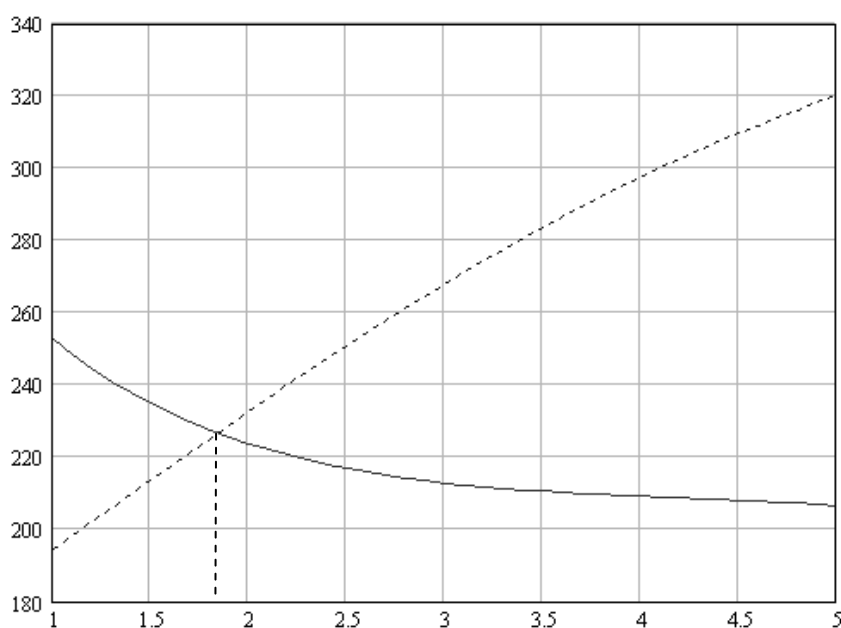


Рис. 5. Графическое решение уравнения $f(a) - g(a) = 0$

Если напряжение σ_0 станет равным $\sigma_0^{\text{пр}}$, трещина достигнет критической величины a_k . После этого начнется спонтанный рост трещины и в итоге трещина распространится вдоль сечения $I-I$, что приведет к разрушению элемента конструкции.

Заключение

Предлагаемый метод позволяет достаточно просто и с большой степенью достоверности определять критическое значение длины трещины и предельное напряжение, при которых происходит разрушение элемента конструкции. В связи с этим метод представляет значительный интерес при решении многочисленных задач инженерной практики.

Литература

1. Ковальчук, Б. И. Механика неупругого деформирования материалов и элементов конструкций / Б. И. Ковальчук, А. А. Лебедев, С. Э. Уманский. – К. : Наук. Думка, 1987. – 278 с.
2. Писаренко, Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – К. : Наук. Думка, 1976. – 416 с.
3. Махутов, Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н. А. Махутов. – М. : Машиностроение, 1981. – 272 с.
4. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – М. : Наука, 1974. – 620 с.
5. Определение коэффициента интенсивности напряжений при различных коррозионных повреждениях с трещиной в стенке трубопровода / Г. П. Тариков [и др.] // Наукоемкие технологии. – 2009. – Т. 9, № 9. – С. 26–29.

Получено 20.09.2013 г.

УДК 621.121

ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВИХРЕВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАСХОДА ЖИДКОФАЗНОЙ СРЕДЫ

И. В. КОРОБКО, В. А. КОВАЛЕНКО

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»*

Введение

Подготовка, транспортировка, распределение, потребление топливно-энергетических ресурсов и воды (ТЭРВ) непосредственно связаны с организацией их точного учета, который базируется на применении технических средств измерений, систем учета и регулировки энергопотребления. Разнообразие и сложность требований, предъявляемых к современным измерительным преобразователям расхода (ИПР) ТЭРВ, а также области их применения привели к появлению различных методов измерения. Среди них широко применяются для коммерческого учета и потребления воды в различных отраслях промышленности благодаря многим преимуществам вихревые ИПР.

Современные вихревые расходомеры и счетчики имеют достаточно высокие метрологические характеристики (погрешность в среднем составляет $\pm 0,5\text{--}1\%$) [1]. Отсутствие у данного типа ИПР движущихся частей значительно повышает их надежность и, как следствие, продлевает срок эксплуатации. В то же время более широкое использование вихревых преобразователей ограничивается характером взаимодействия потока жидкости с чувствительными элементами (ЧЭ) преобразователей. На характер данного взаимодействия оказывают влияние многочисленные факторы и параметры, одними из главных являются размер и форма ЧЭ, которые представляют собой тело обтекания (ТО).

Постановка задачи

Принцип действия ИПР и ТО базируется на фиксации вихрей, которые возникают за телом, расположенным в потоке. Частота срыва вихрей пропорциональна объемному расходу. Учитывая требования современности к ИПР, а именно: высокие точность, надежность и повторяемость результатов измерения, линейность шкалы, большой диапазон измерения и быстродействие прибора, для создания современных приборов необходимо определить рациональные значения конструктивных параметров, особенно оптимальную геометрию ТО.

Экспериментальные исследования влияния формы ТО на метрологические характеристики вихревых ИПР связаны со значительными сложностями, в частности временного и экономического плана. В то же время особой популярностью среди ученых пользуются методы численного моделирования гидродинамических процессов на технологической базе вычислительной гидродинамики CFD (Computational Fluid Dynamics), благодаря которым можно ставить эксперименты, не тратя на них много времени и средств [2]. Кроме того, во многих случаях такой способ получения информации есть единственно возможный для определения эффектов от сложного взаимодействия потока измеряемой среды и ЧЭ ИПР [3], [4].

Исследование геометрических форм тел обтекания вихревых измерительных преобразователей

Все ТО, которые используются в вихревой расходомерии, можно условно разделить на призматические и цилиндрические. Первые в поперечном сечении представляют собой многоугольник (как правило, треугольник или трапецию, реже Т-образные тела, размещенные основой навстречу потоку), вторые – кругообразные фигуры (обычно различные варианты срезанных кругов) [5]. Такие ТО образуют сильные и регулярные вихревые колебания, хотя и создают большую потерю давления [1], [3].

В современных конструкциях вихревых ИПР получили широкое применение ТО следующих геометрических форм: цилиндр, треугольная и трапециевидная призма и параллелепипед, которые и были выбраны для исследований. Во многих случаях в качестве критерия оптимальности формы ТО принимают [6]: устойчивость частоты образования вихрей при возможно меньших скоростях потока, неизменность числа Струхала Sh в рабочем диапазоне ИПР, появление кавитационных процессов при как можно больших скоростях, технологичность конструкций ТО.

В то же время кавитационное число зависит от потери давления на ТО, поэтому целесообразно рассмотреть в качестве критерия оптимальности величину потери давления [5]. Что касается технологичности конструкции, то современные технологии позволяют достаточно просто создавать ТО сложной геометрической формы. Учитывая вышеизложенное, в качестве критерия оптимальности формы ТО можно взять [5]: устойчивость частоты образования вихрей при малых скоростях потока (небольших числах Рейнольдса Re), стабильность в рабочем диапазоне расхода ИПР числа Струхала Sh , которое характеризует периодические процессы, связанные с движением жидкости, и минимальные потери давления на ТО.

Анализ результатов исследований зависимости числа Струхала от числа Рейнольдса в широком диапазоне расхода жидкости [7] показывает, что для обеспечения удовлетворительного совпадения закона распределения числа Струхала с нормальным для чисел Рейнольдса отношение характерного размера ЧЭ к диаметру условного прохода D должно быть не более 0,3. Характерным размером ТО цилиндрической формы является его диаметр, для трапециевидной формы – ширина основания.

Оптимальные соотношения между характерным размером ТО d и внутренним диаметром измерительной камеры преобразователя D , при которых обеспечивается пропорциональность между расходом и частотой вихреобразования при постоянном числе Струхала Sh [3], [7] имеют следующие значения:

а) для цилиндрических ТО: $\frac{d}{D} = 0,15-0,25$;

б) для ТО в форме треугольной призмы: длина основания $l_0 = \frac{D}{3}$, а высота равнобедренного треугольника $h = \frac{D}{9}$;

в) для прямоугольного ТО: $\frac{d}{D} = 0,26$ и $\frac{h}{d} = 0,66$;

г) для ТО в форме трапециевидной призмы: $\frac{d}{D} = 0,21$ и $\frac{h}{d} = 0,57$.

Для определения рациональной формы ТО вихревых ИПР исследованы с использованием программного комплекса ANSYS CFX зависимости потери давления на преобразователе от числа Рейнольдса Re , определены значения числа Струхала Sh и устойчивая частота вихреобразования.

При численном моделировании были построены пространственные 3D модели измерительного участка трубопровода с ТО в виде цилиндра, треугольной и трапециевидной призм и параллелепипеда (табл. 1). При расчетах, полученных с 3D моделей была выбрана сетка Tet/Hybrid типа TGrid. Размер одной ячейки составлял $8 \cdot 10^{-4}$ м, что обеспечило высокую точность расчетов данной сетки, также выбрана турбулентная модель потока *k-epsilon*, поскольку расчеты числа Рейнольдса показывают, что во всем диапазоне измерения расхода должен быть турбулентный, по характеру протекания, поток жидкости.

Среднее значение скорости потока жидкости на участке вихреобразования задавалось равным $v_{cp} = 4,5 \cdot 10^{-2} \frac{м}{с}$, что соответствует расходу $Q = 15 \frac{м^3}{ч}$.

Геометрические параметры исследуемых ТО приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры ТО

Форма ТО	Длина l , м	Ширина основания a , м	Высота b , м	Характерный размер d , м
Цилиндр	0,05	—	—	0,01
Призма	0,05	0,01	0,01	$14,3 \cdot 10^{-3}$
Параллелепипед	0,05	0,01	—	$10 \cdot 10^{-3}$
Трапеция	0,05	0,01	0,01	$12,76 \cdot 10^{-3}$

По результатам численного моделирования получены визуализированные картины течения жидкости в области взаимодействия измеряемой среды с ТО (рис. 1–4), отражающие характер обтекания неподвижных тел и вихреобразования за ними.

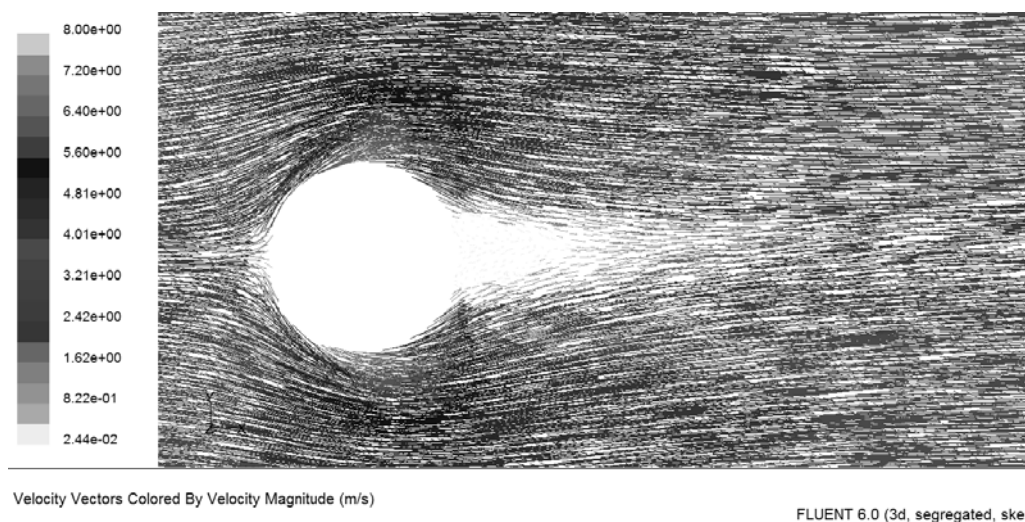


Рис. 1. Визуализированная картина течения жидкости в области взаимодействия измеряемой среды с ТО в форме цилиндра

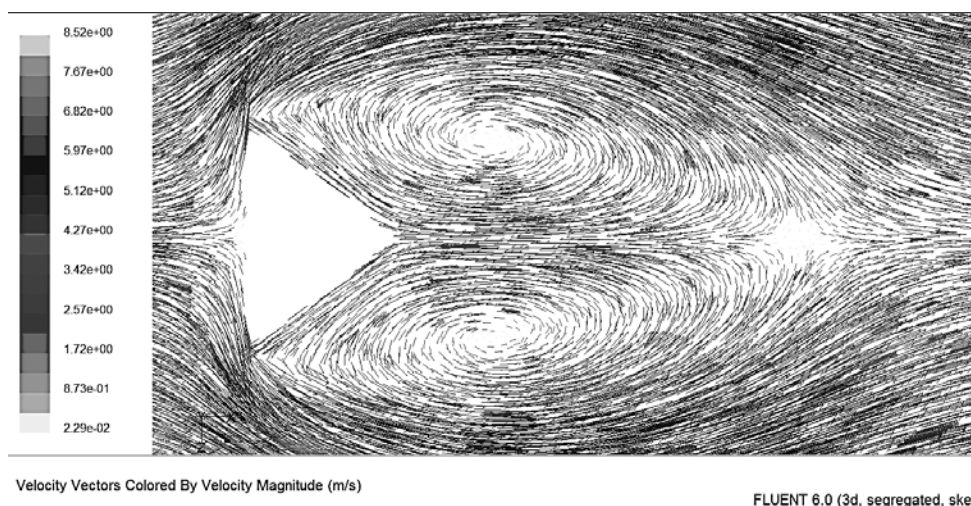


Рис. 2. Визуализированная картина течения жидкости в области взаимодействия измеряемой среды с ТО в форме треугольной трапеции

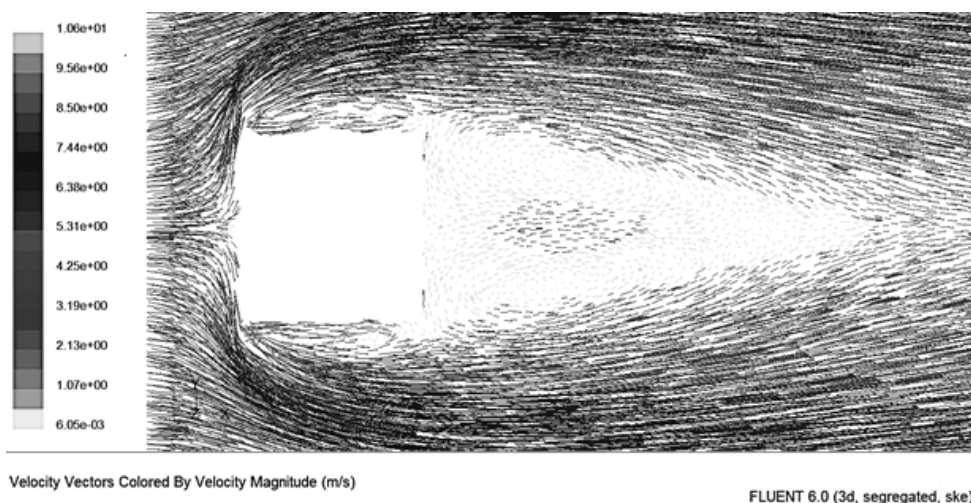


Рис. 3. Визуализированная картина течения жидкости в области взаимодействия измеряемой среды с ТО в форме параллелепипеда

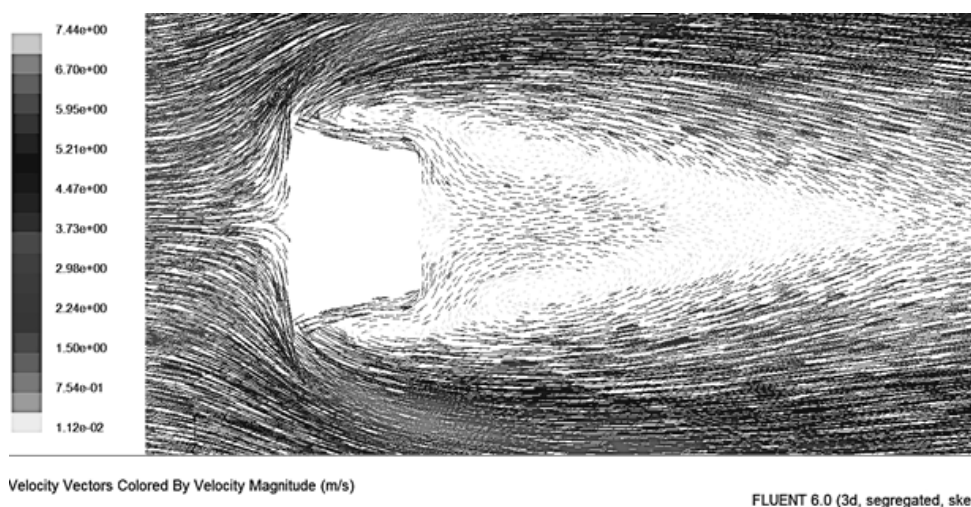


Рис. 4. Визуализированная картина течения жидкости в области взаимодействия измеряемой среды с ТО в форме трапецевидной призмы

Анализ результатов численного моделирования взаимодействия жидкофазной среды с ТО цилиндрической формы (рис. 1) показывает, что после него образуются незначительные завихрения потока, которые не являются достаточно устойчивыми для обеспечения точного измерения скорости потока, а соответственно и расхода. Это указывает на отсутствие четкой точки отрыва пограничного слоя, что нарушает устойчивость частоты вихреобразования и необходимость других исходных условий (скорость потока, соотношение диаметра трубопровода к характерному размеру ТО, которым в данном случае является диаметр цилиндра). В то же время ТО цилиндрической формы получили довольно широкое применение благодаря тому, что они создают условия для уменьшения потери давления, обеспечивают устойчивость геометрической формы и легкую очистку от имеющихся в потоке примесей и включений.

Исследования ТО в форме треугольной призмы (рис. 2) показали, что после ТО образуется завихрение, но геометрические параметры этих тел не позволяют образоваться правильной дорожке Кармана с последовательным срыванием вихрей с разных сторон ТО. Необходимо отметить, что значительное влияние на вихреобразование имеет острота кантов (ребер) таких ТО, которые могут изменяться в результате изнашивания при эксплуатации (особенно при измерении агрессивных сред и веществ с абразивными примесями).

Предварительный анализ результатов исследований ТО в форме прямоугольного параллелепипеда (рис. 3) показывает, что характер обтекания зависит от ориентации данного тела относительно набегающего потока. В целом наблюдается устойчивое вихреобразование и его особенности проявляются в срыве вихрей на острых кантах препятствия в потоке, вихри образуются в достаточно четкой последовательности. В то же время необходимо отметить достаточно высокое падение давления на таком ТО.

Исследования трапециевидного ТО показывают, что за ТО образуется постоянная дорожка Кармана с последовательным срывом вихрей с обеих сторон препятствия (рис. 4).

Для более точного анализа взаимодействия жидкофазной среды с ТО были исследованы с помощью программного комплекса ANSYS CFX гидродинамические параметры потока (частота вихреобразования, скорости вдоль оси вихреобразования, число Струхала) и падение давления на измерительном участке.

Скорость вихря можно определить по выражению [3], [4]:

$$u = \frac{\Gamma}{2\sqrt{2}l_{\text{в}}}, \quad (1)$$

где

$$\Gamma = \oint v dS = \oint \omega r \cdot r d\varphi = \omega r^2 \cdot \varphi_0^{2\pi} = 2\pi r^2 \omega; \quad (2)$$

ω – угловая частота вихря; v – скорость потока в зоне вихреобразования; $l_{\text{в}}$ – расстояние между вихрями.

Учитывая (2), выражение (1) приобретает вид:

$$u = \frac{\pi dv}{2\sqrt{2}l_{\text{в}}}. \quad (3)$$

По значению скорости образования вихрей u можно определить число Струхала. В системе координат, в которой ТО находится в состоянии покоя, дорожка вихрей движется со скоростью, что по абсолютной величине равна $v - u$. Когда дорожка

сместится на l_b , то вся картина движения вихрей повторяется. Выражение для периода движения вихрей можно записать в виде:

$$T = \frac{l_b}{v - u}. \quad (4)$$

Учитывая зависимость (4), определим частоту вихреобразования:

$$f = \frac{v - u}{l_b}. \quad (5)$$

После преобразований выражение (5) приобретает вид:

$$f = \left(1 - \frac{u}{v}\right) \frac{dv}{l_b d}. \quad (6)$$

С другой стороны,

$$f = \text{Sh} \frac{v_2}{d}, \quad (7)$$

где v_2 – средняя скорость потока в сечении трубопровода, где установлено ТО.

С учетом (7) и (6) получим выражение для числа Струхалия:

$$\text{Sh} = \left(1 - \frac{u}{v}\right) \frac{d}{l_b}. \quad (8)$$

Используя выражения (7) и (8), по результатам численного моделирования определяем частоту вихреобразования и значение числа Струхалия, а также падение давления на измерительном участке (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительная характеристика тел обтекания

Форма тела обтекания	f , Гц	Sh	ΔP , Па
Цилиндр	11,6	0,18	3321
Треугольная призма	12,04	0,2	10756
Правильный параллелепипед	18,3	0,22	12837
Трапецевидная призма	22,08	0,23	4055

Заключение

Анализируя результаты исследований ТО различных форм, можно сделать выводы, что для вихревого ИПР жидкофазной среды целесообразно использовать ТО в форме трапецевидной призмы, поскольку частота вихреобразования наибольшая при данном ТО, а также наибольшее значение числа Струхалия. Кроме этого, после ТО в форме трапецевидной призмы образуется дорожка Кармана с устойчивыми характеристиками.

Поэтому вихревые расходомеры с ТО трапецевидной формы имеют лучшие метрологические характеристики и измеряют расход жидкости с высокой точностью.

Литература

1. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества / П. П. Кремлевский. – Л. : Машиностроение, 1989. – 701 с.

2. Гришанова, І. А. Системи CAD/CAE. ANSYS FLUEN / І. А. Гришанова, І. В. Коробко. – К. : Дія ЛТД, 2012. – 208 с.
3. Киясбейли, Л. Ш. Вихревые счетчики-расходомеры / Л. Ш. Киясбейли, М. Е. Перельштейн. – Л. : Машиностроение, 1974. – 160 с.
4. Перельштейн, М. Е. Приборы и системы управления / М. Е. Перельштейн. – 1977. – № 1. – С. 22–24.
5. Остапів, В. В. Критерії оптимізації ТО вихорвих витратомірів / В. В. Остапів, Н. М. Піндус, С. А. Чеховський // Системи обробки інформації. – 2010. – Вип. 9 (90). – С. 77–79.
6. Лурье, М. С. Тела обтекания вихревых расходомеров / М. С. Лурье, О. М. Лурье // Датчики и системы. – 2008. – № 10. – С. 21–23.
7. Маштаков, Б. П. Вихревые расходомеры с телом обтекания. Перспективы вихревой расходомерии / Б. П. Маштаков, А. В. Грикевич // Приборы и системы управления. – 1990. – № 12. – С. 24–26.

Получено 20.09.2013 г.

УДК 621.89

К РЕШЕНИЮ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧЕ

Г. П. ТАРИКОВ

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

В. Н. ПАРХОМЕНКО

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Введение

В процессе работы зубчатой передачи (системы шестерня-колесо) зубья нагреваются, что влияет на распределение контактных давлений по площадке контакта. Пространственная контактная задача с учетом тепловыделения применительно к деталям машин и механизмов до сих пор является актуальной [4]. Большое количество работ посвящено изучению данного вопроса [3]. В работах [1], [2] данная задача исследуется с учетом тепловых явлений, т. е. решается пространственная контактная задача термоупругости.

Целью работы является вывод интегрального уравнения контактной задачи термоупругости применительно к зубчатой передаче с точечным контактом.

Постановка задачи

Рассматривается термоупругая задача о контакте зубьев (шестерни и колеса) с начальным контактом в точке. При этом задаются радиусами кривизны контактирующих тел в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 1).

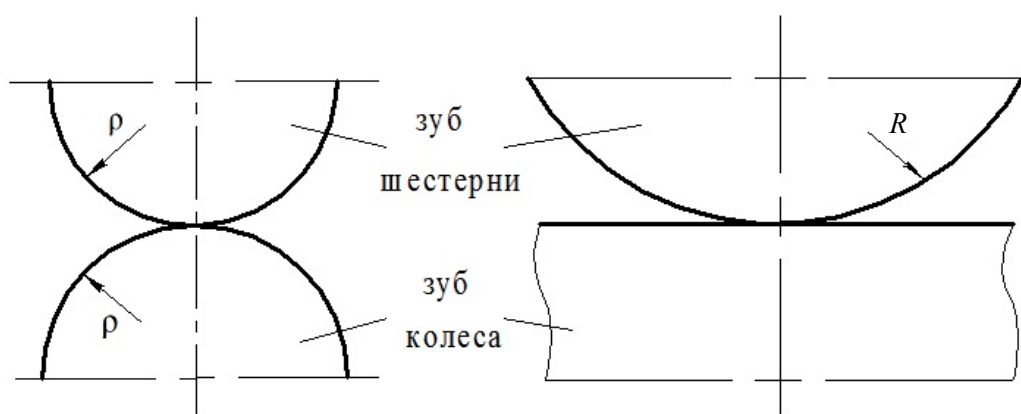


Рис. 1. Схема зубчатой передачи с точечным контактом

На рис. 2 показан зуб шестерни с криволинейными образующими боковых поверхностей.

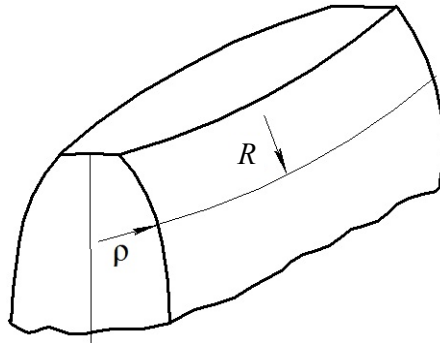


Рис. 2. Зуб шестерни с криволинейными образующими боковых поверхностей

В соответствии с гипотезой Герца контактирующие тела при определении напряженного состояния заменяются упругими полупространствами, прижатыми друг к другу по площадке контакта. Поэтому вначале построим решение краевой задачи термоупругости для полупространства.

Пространственная задача термоупругости в перемещениях сводится к решению дифференциального уравнения равновесия

$$\frac{1}{1-2\nu} \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) + \nabla^2 \vec{u} = \frac{1+\nu}{1-2\nu} \nabla(\alpha\theta) \quad (1)$$

и уравнения теплопроводности

$$\nabla^2 \theta = 0. \quad (2)$$

Здесь $\vec{u}$ – вектор перемещений; ν – коэффициент Пуассона; ∇ – nabla-оператор; ∇^2 – оператор Лапласа; α – коэффициент линейного расширения; θ – температура, которая отсчитывается от температуры естественного состояния.

К уравнениям (1) и (2) необходимо добавить еще граничные условия, которые будут сформулированы позже.

Известные способы интегрирования уравнения (1) базируются в основном на представлении Папковича–Нейбера, в котором вектор перемещений выражается через гармонический вектор и гармонический скаляр. Однако, структура решения данного представления такова, что сложно удовлетворять условиям общего вида. Поэтому, воспользуемся другой формой решения уравнения (1), которая позволяет без особых затруднений удовлетворять граничным условиям довольно общего вида.

Следуя работе (3), будем использовать общее решение уравнения (1) в таком виде:

$$\vec{u} = \vec{B} - \frac{1}{2(1-2\nu)} x_3 \nabla \varphi + \frac{(1+\nu)\alpha}{2(1-\nu)} \nabla(x_3 \phi), \quad (3)$$

где $\nabla^2 \vec{B} = 0$; $\nabla^2 \varphi = 0$ $\frac{\partial \varphi}{\partial x_3} = \frac{2(1-\nu)}{3-4\nu} (\nabla \cdot \vec{B})$; $\theta = \frac{\partial \phi}{\partial x_3}$.

Здесь использована прямоугольная система координат x_1, x_2, x_3 , причем ось x_3 направлена перпендикулярно к границе полупространства.

В формуле (3) $\vec{B}$ – гармонический вектор; φ – гармонический скаляр.

В компонентах декартовой системы координат решение (3) имеет вид:

$$u_1 = B_1 - \frac{1}{2(1-2\nu)} x_3 \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} + \beta x_3 \frac{\partial \phi}{\partial x_1};$$

$$\begin{aligned} u_2 &= B_2 - \frac{1}{2(1-2\nu)} x_3 \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} + \beta x_3 \frac{\partial \phi}{\partial x_2}; \\ u_3 &= B_3 - \frac{1}{2(1-2\nu)} x_3 \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} + \beta \left(x_3 \frac{\partial \phi}{\partial x_3} + \phi \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\beta = \frac{(1+\nu)\alpha}{2(1-\nu)}$; $\theta = \frac{\partial \phi}{\partial x_3}$.

Компоненты B_1 , B_2 , B_3 гармонического вектора $\vec{B}$ могут быть найдены с использованием граничных условий.

Чтобы перейти к напряжениям, необходимо воспользоваться обобщенным законом Гука с учетом температурных слагаемых:

$$\hat{T} = 2\mu \left[\frac{\nu}{1-2\nu} \hat{E}(\nabla \cdot \vec{u}) + \hat{\varepsilon} - \frac{1+\nu}{1-2\nu} \alpha \theta \hat{E} \right], \quad (5)$$

где $\hat{T}$, $\hat{\varepsilon}$ – тензоры напряжений и деформаций; μ – модуль сдвига; $\hat{E}$ – единичный тензор.

Пусть на плоскости $x_3 = 0$ заданы нормальные напряжения σ_{33} , а касательные напряжения σ_{33} и σ_{32} отсутствуют, т. е.

$$\sigma_{33} = \begin{cases} -f(x_1, x_2), & (x_1, x_2) \in \Omega; \\ 0, & (x_1, x_2) \notin \Omega, \end{cases}$$

где Ω – область нагружения в плоскости $x_3 = 0$.

Удовлетворяя этим граничным условиям и используя формулы (4) и (5), находим гармонические функции B_1 , B_2 , B_3 и φ :

$$\begin{aligned} B_1 &= -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial N_3}{\partial x_1} + \frac{\nu}{1-2\nu} \frac{\partial \psi}{\partial x_1} - 2\beta \frac{\partial \xi}{\partial x_1}; \\ B_2 &= -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial N_3}{\partial x_2} + \frac{\nu}{1-2\nu} \frac{\partial \psi}{\partial x_2} - 2\beta \frac{\partial \xi}{\partial x_2}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$B_3 = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial N_3}{\partial x_3} + \frac{1}{2} \varphi;$$

$$\varphi = -\frac{1-2\nu}{\mu} \frac{\partial N_3}{\partial x_3} + 2(1-2\nu)\beta\phi;$$

$$\varphi = \frac{\partial \psi}{\partial x_3}; \phi = \frac{\partial \xi}{\partial x_3}; \theta = \frac{\partial \phi}{\partial x_3}; \quad (7)$$

$$N_3(x_1, x_2, x_3) = N(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{2\pi} \iint_{\Omega} f(y_1, y_2) \ln(x_3 + r) dy_1 dy_2,$$

$$r = [(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2]^{1/2}.$$

Подставляя выражения (6) в третью формулу (7), получаем:

$$u_3 = -\frac{1}{2\mu} \left[2(1-\nu) \frac{\partial N_3}{\partial x_3} - x_3 \frac{\partial^2 N_3}{\partial x_3^2} + 4(1-\nu)\mu\beta\phi \right]. \quad (8)$$

Решение уравнения теплопроводности

Для использования полученных выше результатов необходимо располагать решением уравнения теплопроводности (2). При решении уравнения теплопроводности можно использовать различные граничные условия. Пусть граничное условие для температуры θ имеет вид:

$$\theta = \begin{cases} \theta_0(x_1, x_2), & (x_1, x_2) \in \Omega_0; \\ 0, & (x_1, x_2) \notin \Omega, \end{cases} \quad (9)$$

где Ω_0 – область (в плоскости $x_3 = 0$), в которой поддерживается ненулевая температура.

Решение уравнения теплопроводности (2) можно представить в таком виде:

$$\phi(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{2\pi} \iint_{\Omega} \frac{1}{r} \theta_0(y_1, y_2) dy_1 dy_2, \quad (10)$$

где $\theta = \frac{\partial \phi}{\partial x_3}$.

Решение (10) удовлетворяет граничному условию (9), т. е. соответствует случаю, когда в области Ω_0 задана температура θ . Однако можно задавать интенсивность теплового потока на площадке Ω_0 , а вне этой площадки (в плоскости $x_3 = 0$) полагать, что интенсивность теплового потока равна нулю.

Если задавать тепловой поток на площадке контакта, то придем к такому интегральному уравнению контактной задачи термоупругости, которое, по-видимому, нельзя решить в аналитической форме. Поэтому, в дальнейшем будем использовать граничные условия (9) и решение уравнения теплопроводности (10).

Подставляя в формулу (8) выражение для N из (7), будем иметь:

$$u_3(x_1, x_2, x_3) = \frac{1-\nu}{2\pi\mu} \iint_{\Omega} f(y_1, y_2) \frac{dy_1 dy_2}{r} - \frac{x_3}{4\pi\mu} \frac{\partial}{\partial x_3} \iint_{\Omega} f(y_1, y_2) \frac{dy_1 dy_2}{r} - \frac{1-\nu}{\pi} \iint_{\Omega} \beta \theta_0(y_1, y_2) \frac{dy_1 dy_2}{r}. \quad (11)$$

При составлении формулы (11) учтено выражение (10), а также то, что

$$\frac{\partial}{\partial x_3} \ln(x_3 + r) = \frac{1}{r}.$$

По формуле (11) можно определить перемещение u_3 в любой точке полупространства $x_3 \geq 0$.

Чтобы получить перемещение u_3 в точках на границе полупространства, положим в (11) $x_3 = 0$. В результате получим:

$$u_3(x_1, x_2, 0) = \frac{1-\nu}{2\pi\mu} \iint_{\Omega} f(y_1 y_2) \frac{dy_1 dy_2}{R} - \frac{1+\nu}{2\pi} \alpha \iint_{\Omega} \theta_0(y_1 y_2) \frac{dy_1 dy_2}{R} \theta. \quad (12)$$

В формуле (12) учтено, что

$$(1-\nu)\beta = \frac{1}{2}(1+\nu)\alpha;$$

$$R^2 = (x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2.$$

Формула (12) имеет отношение к одному полупространству. При рассмотрении контактной задачи каждое из контактирующих тел заменяется упругим полупространством. Поэтому, когда рассматривается контакт двух упругих тел, то [5]:

$$u_3(x_1, x_2, 0) = u_3^{(1)}(x_1, x_2, 0) + u_3^{(2)}(x_1, x_2, 0) = \delta - \varphi_1(x_1, x_2) - \varphi_2(x_1, x_2) \text{ при } (x_1, x_2) \in \Omega.$$

Здесь δ – сближение упругих тел; $\varphi_1(x_1, x_2)$, $\varphi_2(x_1, x_2)$ – уравнения поверхностей соприкасающихся тел.

Уравнение (12) можно представить в таком виде:

$$\delta - \varphi_1(x_1, x_2) - \varphi_2(x_1, x_2) = \frac{(\vartheta_1 + \vartheta_2)}{2\pi} \frac{1}{R} p(y_1 y_2) dy_1 dy_2 - \frac{(\eta_1 + \eta_2)}{2\pi} \iint_{\Omega} \frac{1}{R} \theta_0(y_1 y_2) dy_1 dy_2 \quad (13)$$

при $(x_1, x_2) \in \Omega$.

$$\text{Здесь } \vartheta_i = \frac{1-\nu_i}{\mu_i}; \quad \eta_i = (1+\nu_i)\alpha_i, \quad i = 1, 2.$$

На основании граничного условия для напряжения σ_{33} имеем, что $f(x_1, x_2) = p(x_1, x_2)$, где p – нормальное давление на площадке контакта. Это отражено в первом интеграле уравнения (13).

Ограничиваясь в уравнении (13) рассмотрением лишь локальных эффектов [5], получаем:

$$\delta - \frac{x_1^2}{2R_1} - \frac{x_2^2}{2R_2} = \frac{(\vartheta_1 + \vartheta_2)}{2\pi} \iint \frac{1}{R} p(y_1 y_2) dy_1 dy_2 - \frac{(\eta_1 + \mu_2)}{2\pi} \iint_{\Omega} \frac{1}{R} \theta_0(y_1 y_2) dy_1 dy_2 \quad (14)$$

при $(x_1, x_2) \in \Omega$.

Уравнение (14) является двумерным интегральным уравнением первого рода контактной задачи термоупругости. Распределение температуры тел в области контакта в уравнении (14) выражена функцией $\theta_0(x_1, x_2)$, которая считается известной. Функция $p(x_1, x_2)$ определяется в результате решения уравнения (14). Вопросы, связанные с определением радиусов R_1 и R_2 , подробно рассматриваются в монографии [5].

Заключение

Получено двумерное интегральное уравнение контактной задачи термоупругости первого рода, решение которого позволит исследовать влияние температуры зубьев на распределения контактных давлений по эллиптической площадке контакта и определить величины полуосей контактного эллипса.

Литература

1. Бородачев, Н. М. О решении пространственной температурной задачи теории упругости в перемещениях / Н. М. Бородачев, В. В. Астанин // Проблемы прочности. – 2005. – № 3. – С. 86–95.
2. Бородачев, Н. М. Пространственная контактная задача с учетом тепловыделения при трении скольжения / Н. М. Бородачев, Г. П. Тариков // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 2. – С. 153–160.
3. Бородачев, Н. М. О задаче Герца с учетом тепловыделения / Н. М. Бородачев, Г. П. Тариков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2003. – Т. 47, № 2. – С. 3.
4. Иванов, М. Н. Детали машин / М. Н. Иванов. – М. : Высш. шк., 1991. – 383 с.
5. Лурье, А. И. Теория упругости / А. И. Лурье. – М. : Наука, 1970. – 939 с.

Получено 20.09.2013 г.

УДК 631.35

РАЦИОНАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ ПО ОПОРАМ САМОХОДНОГО КОРМОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

О. В. РЕХЛИЦКИЙ, Ю. В. ЧУПРЫНИН

*Республиканское конструкторское унитарное предприятие
«ГСКБ по зерноуборочной и кормоуборочной технике»,
г. Гомель, Республика Беларусь*

Введение

Правильное распределение массы в конструкции самоходного кормоуборочного комбайна закладывается на самом начальном этапе его проектирования. При планировании распределения массы разработчики должны руководствоваться совокупностью критериев, выполнение которых позволяет обеспечить самоходному кормоуборочному комбайну требуемые свойства.

Кормоуборочный комбайн состоит из самоходного измельчителя, включающего шасси и внутренние технологические органы, и адаптера, осуществляющего подачу технологической массы с поля. На самоходном кормоуборочном комбайне кроме заправочных топливных емкостей отсутствуют емкости для перевозимого груза или технологического продукта, заполнение или опорожнение которых может оказывать существенное влияние на величину и распределение массы. Основное влияние на изменение величины и распределения массы оказывает наличие, состояние и тип адаптера.

Самоходный кормоуборочный комбайн имеет несколько состояний, при которых существенно меняется и величина массы и ее распределение. Для обеспечения удовлетворительных тяговых свойств, продольной, поперечной устойчивости и управляемости необходимо на начальном этапе проектирования комбайна проводить анализ всех этих состояний и осуществлять рациональный подбор веса и расположения всех его агрегатов и агрегируемых с ним адаптеров.

Постановка задачи

При осуществлении кормоуборочным комбайном технологического процесса адаптер часть своего веса переносит на раму машины. Остальная часть веса адаптера воспринимается через опорные элементы поверхностью поля, если на этом технологическом процессе требуется копировать рельеф поля. На этом режиме присутствует дополнительная сила продольного сопротивления передвижению за счет трения опорных элементов адаптера по опорной поверхности. На этом режиме адаптер имеет минимальную высоту центра тяжести, что также оказывает влияние на устойчивость и перераспределение массы по опорам на уклонах.

При осуществлении коротких технологических переездов по полю или по полевым дорогам, адаптер может транспортироваться на самом комбайне. На этом режиме адаптер переводится навесным устройством комбайна в верхнее транспортное положение, но не меняет своей формы.

При осуществлении длительных транспортных переездов адаптер, если его конструкцией предусмотрена транспортировка на машине на длительные расстояния, поднимается вверх и переводится в транспортное состояние. Это также приводит к изменению расположения его центра тяжести и по вертикали и по горизонтали.

Те адаптеры, конструкцией которых не предусмотрена транспортировка на машине на длительное расстояние, снимаются с машины и перевозятся на специальной транспортной тележке. В этом случае существенно меняется распределение веса комбайна по опорам и величина опорных реакций. Кроме того, к общей массе комбайна, участвующего в длительном транспортном переезде, как по дорогам общего пользования, так и по полевым и проселочным дорогам, имеющим повышенное сопротивление самопередвижению, добавляется масса транспортной тележки, что в условиях разгрузки колес переднего ведущего моста при движении машины в гору может оказать существенное влияние на снижение тяговых свойств по критерию сцепления с опорной поверхностью.

Все это многообразие ситуаций дополняется тем, что комбайн имеет некоторый набор адаптеров, имеющих отличие по весу и расположению центра масс.

При проектировании самоходного кормоуборочного комбайна необходимо подобрать такие геометрические параметры и такое расположение центра масс, чтобы во всех возможных его состояниях со всем шлейфом предусмотренных адаптеров выполнялись условия продольной и поперечной устойчивости, управляемости и обеспечивалось достаточное сцепление ведущих колес с опорной поверхностью для преодоления предусмотренных технической характеристикой уклонов.

Для обеспечения этого условия необходимо на начальном этапе проектирования комбайна осуществлять оценку распределения массы машины по опорам. Для этого в свою очередь требуется разработать универсальный и удобный математический аппарат, позволяющий проводить расчет реакций на опорах комбайна с учетом продольных и поперечных уклонов местности.

Математическая модель

Расчетная схема каркаса кормоуборочного комбайна для составления математической модели определения нагрузок на опоры приведена на рис. 1.

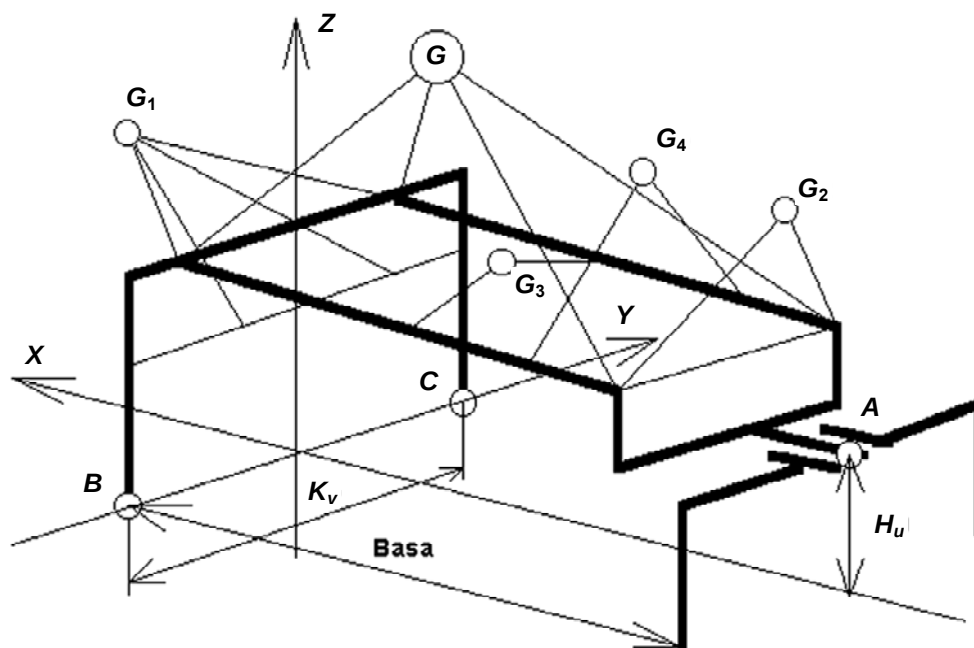


Рис. 1. Расчетная схема для определения нагрузок на опоры:
 А – шарнир качания управляемого моста; В и С – левое и правое колесо ведущего моста соответственно; G_1 , G_2 , G_3 – центры тяжести различных узлов и агрегатов;
 G – суммарный центр тяжести комбайна; K_v – колеса ведущих колес;
 Basa – база комбайна; H_u – высота шарнира управляемого моста

Самоходные кормоуборочные комбайны не имеют подвески ходовой части в том виде, в котором она присутствует у автомобилей и некоторых тракторов. Копирование рельефа опорной поверхности они осуществляют за счет качающейся балки управляемого моста. При этом, опираясь на четыре колеса, рама комбайна фактически опирается на три точки, двумя из которых являются ведущие колеса, третьей является шарнир качания управляемого моста. Причем вес самого управляемого моста с колесами участвует в формировании нагрузок на колеса, но не участвует при определении углов статической поперечной устойчивости.

Для разработки математического аппарата воспользуемся трехточечной схемой расположения опор и векторным способом [1] определения реакций.

Начало системы координат расположено на опорной поверхности на пересечении оси ведущего моста с продольной геометрической осью комбайна. Ось X направлена вперед по ходу движения; ось Y направлена вправо; ось Z направлена вверх. Направление осей X, Y, Z показано на расчетной схеме.

Для нахождения центра тяжести (ЦТ) воспользуемся выражениями (1)–(5):

$$M_{\Sigma} = \sum_i M_i; \quad (1)$$

$$X_{\Sigma} = \frac{\sum_i (M_i X_i)}{M_{\Sigma}}; \quad (2)$$

$$Y_{\Sigma} = \frac{\sum_i (M_i Y_i)}{M_{\Sigma}}; \quad (3)$$

$$Z_{\Sigma} = \frac{\sum_i (M_i Z_i)}{M_{\Sigma}}; \quad (4)$$

$$\vec{G}_{\Sigma} = \begin{bmatrix} X_{\Sigma} \\ Y_{\Sigma} \\ Z_{\Sigma} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где M_i, M_{Σ} – масса i -го узла и суммарная масса комбайна соответственно; $X_i, Y_i, Z_i, X_{\Sigma}, Y_{\Sigma}, Z_{\Sigma}$ – продольная, поперечная и вертикальная координата центра тяжести i -го узла и ЦТ комбайна соответственно; $\vec{G}_{\Sigma}$ – вектор суммарного центра тяжести комбайна.

Сформируем вектора опор A, B и C :

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} -Basa \\ 0 \\ H_u \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -K_v \cdot 0,5 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$\vec{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ K_v \cdot 0,5 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Выражения (6)–(8) являются векторами опор для случая, когда ведущий и управляемый мосты симметричны относительно продольной оси комбайна.

Сформируем вспомогательный вектор для моделирования уклона опорной поверхности в продольной и поперечной плоскости, являющийся аналогом повернутого относительно опорной поверхности вектора гравитации (9):

$$\vec{Z} = \begin{bmatrix} \sin(\beta) \\ \sin(\alpha) \\ -\cos(\alpha + \beta) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где α – угол поперечного уклона опорной поверхности; β – угол продольного уклона опорной поверхности.

Сформируем вектора взаимного расположения опор и ЦТ (10)–(14):

$$\vec{AB} = \vec{B} - \vec{A}; \quad (10)$$

$$\vec{AC} = \vec{C} - \vec{A}; \quad (11)$$

$$\vec{BC} = \vec{C} - \vec{B}; \quad (12)$$

$$\vec{AG}_\Sigma = \vec{G}_\Sigma - \vec{A}; \quad (13)$$

$$\vec{BG}_\Sigma = \vec{G}_\Sigma - \vec{B}. \quad (14)$$

Значения вертикальных реакций можно определить из выражений (15)–(17):

$$R_b = \frac{(\vec{AC} \times \vec{AG}_\Sigma) \vec{Z}}{(\vec{BC} \times \vec{AC}) \vec{Z}} M_\Sigma g; \quad (15)$$

$$R_c = \frac{(\vec{AB} \times \vec{BG}_\Sigma) \vec{Z}}{(\vec{AB} \times \vec{BC}) \vec{Z}} M_\Sigma g; \quad (16)$$

$$R_a = \frac{(\vec{BC} \times \vec{BG}_\Sigma) \vec{Z}}{(\vec{AC} \times \vec{BC}) \vec{Z}} M_\Sigma g, \quad (17)$$

где R_a , R_b , R_c – вертикальные реакции в опорах A , B и C соответственно; g – ускорение свободного падения.

Выражения (15)–(17) дают значения именно вертикальных составляющих реакций в опорах. Для получения нормальных реакций, значения, полученные из выражений (15)–(17), необходимо умножить на косинус угла уклона (18)–(20).

$$R_{bN} = \frac{(\vec{AC} \times \vec{AG}_\Sigma) \vec{Z}}{(\vec{BC} \times \vec{AC}) \vec{Z}} M_\Sigma g \cos(\alpha + \beta); \quad (18)$$

$$R_{cN} = \frac{(\vec{AB} \times \vec{BG}_\Sigma) \vec{Z}}{(\vec{AB} \times \vec{BC}) \vec{Z}} M_\Sigma g \cos(\alpha + \beta); \quad (19)$$

$$R_{aN} = \frac{(\vec{BC} \times \vec{BG}_\Sigma) \vec{Z}}{(\vec{AC} \times \vec{BC}) \vec{Z}} M_\Sigma g \cos(\alpha + \beta). \quad (20)$$

Вышеприведенные выражения (9)–(20) позволяют определить реакции в опорах комбайна в зависимости от углов продольного или поперечного уклона, но только при условии, что эти углы не вводятся в вышеприведенные выражения одновременно, т. е. выражения (9)–(20) дают правильный результат, если выполняется условие (21):

$$\begin{cases} \text{если } \alpha \neq 0, \text{ то } \beta = 0; \\ \text{если } \beta \neq 0, \text{ то } \alpha = 0. \end{cases} \quad (21)$$

Для одновременной оценки влияния продольного и поперечного уклона требуется дополнение этих выражений элементами пространственного поворота векторов. В этом случае все вышеприведенные выражения стали бы весьма громоздкими и неудобными для использования.

Необходимо отметить, что при комбинировании продольного и поперечного уклона местности затрудняется интерпретация результатов расчета, так как суммарный угол при этом все равно не должен превышать максимально допустимое значение и продольного и поперечного уклона, предусмотренного инструкцией по эксплуатации комбайна. Поэтому целесообразность оценки изменения реакций в опорах при комбинированном уклоне является весьма сомнительной. Тем более, что при комбинированном наклоне опорной поверхности всегда можно так сориентировать комбайн, чтобы этот наклон был только продольным или поперечным.

Продольная, поперечная устойчивость и управляемость комбайна

Для определения предельных углов статической поперечной устойчивости можно воспользоваться выражениями (22) и (23):

$$\alpha_{\text{лев}} = \arctg \left(\frac{\vec{AB}_X (-\vec{B}_Y + \vec{G}_Y) - \vec{B}_Y \vec{G}_X}{\vec{AB}_X \vec{G}_Z + \vec{A}_Z \vec{G}_X} \right); \quad (22)$$

$$\alpha_{\text{прав}} = \arctg \left(\frac{\vec{AC}_X (\vec{C}_Y - \vec{G}_Y) + \vec{C}_Y \vec{G}_X}{\vec{AC}_X \vec{G}_Z + \vec{A}_Z \vec{G}_X} \right), \quad (23)$$

где $\alpha_{\text{лев}}$, $\alpha_{\text{прав}}$ – предельные углы поперечной статической устойчивости комбайна влево и вправо по ходу движения соответственно.

На рис. 2 и 3 показаны зависимости углов предельной поперечной статической устойчивости от высоты и продольного смещения ЦТ.

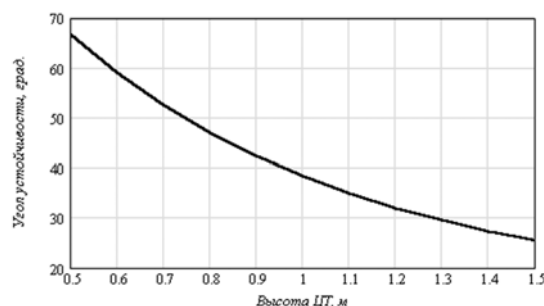


Рис. 2. Зависимость угла поперечной устойчивости от высоты ЦТ, град

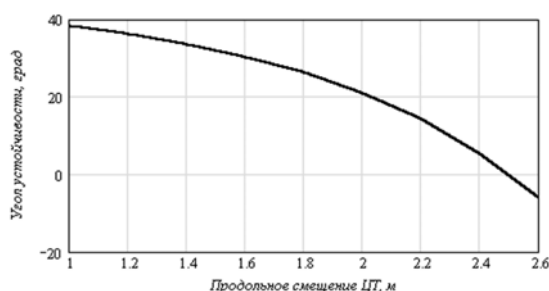


Рис. 3. Зависимость угла поперечной устойчивости от продольного смещения ЦТ, град

Как видно из приведенных графиков, подъем и продольное смещение ЦТ от ведущего моста назад ухудшает поперечную устойчивость вплоть до гарантированного опрокидывания при переходе через точку качания управляемого моста.

Поперечное смещение центра тяжести перераспределяет углы предельной поперечной устойчивости в разные стороны. Подъем шарнира качания управляемого моста при прочих неизменных параметрах улучшает поперечную устойчивость.

Как показывает практика, определенные по вышеприведенным зависимостям углы предельной поперечной статической устойчивости будут отличаться от фактических экспериментально определенных при опрокидывании комбайна на 1,5–2 градуса за счет податливости шин. Поэтому эту коррекцию необходимо учесть при проектной оценке устойчивости разрабатываемого комбайна.

Под продольной устойчивостью комбайна подразумевается способность в конкретном состоянии передвигаться по опорной поверхности на предусмотренной допустимой скорости без отрыва колес даже по пересеченной местности. Первым признаком приближения к потере продольной устойчивости является появление ярко выраженного галопирования.

Под управляемостью комбайна подразумевается наличие достаточной силы сцепления управляемых колес с опорной поверхностью для обеспечения необходимой величины бокового управляющего усилия.

В качестве критерия оценки продольной устойчивости и управляемости может выступать процент нагрузки на управляемый мост от всей массы. В соответствии с действующими стандартами, регламентирующими этот показатель для сельскохозяйственных машин, необходимо обеспечить, чтобы нагрузка на управляемый мост составляла не менее 12 % от веса всего агрегата и не менее 20 % от массы трактора. Из этих двух критериев ограничивающим, как правило, является первый.

Как показывает практика, для обеспечения продольной устойчивости, управляемости и исключения галопирования самоходного кормоуборочного комбайна достаточно, чтобы нагрузка на управляемый мост на горизонте составляла не менее 16 %

от веса агрегата, а на предусмотренных инструкцией по эксплуатации уклонах не падала ниже 12 %.

Тяговые свойства по критерию сцепления

Под предельными тяговыми свойствами по критерию сцепления с опорной поверхностью подразумевается [2]–[4] наличие на ведущих колесах достаточной силы сцепления с опорной поверхностью для преодоления силы сопротивления перекачиванию колес агрегата и силы сопротивления преодолеваемого уклона.

Для обеспечения требуемых тяговых свойств по критерию сцепления с опорной поверхностью необходимо, чтобы предельная сила сцепления ведущих колес уравновешивалась силой сопротивления перекачиванию и силой сопротивления преодолеваемого уклона при наиболее неблагоприятном сочетании коэффициента сопротивления перекачиванию и коэффициента предельного сцепления на угле преодолеваемого уклона не меньшем, чем максимально предусмотренный инструкцией по эксплуатации комбайна.

Проиллюстрируем оценку тяговых свойств на простом примере.

Имеется самоходный кормоуборочный комбайн с собственной массой 6000 кг и с распределением собственного веса на горизонте 60/40 %. Имеется адаптер с массой 2000 кг, при агрегатировании с комбайном в рабочем положении его центр масс находится впереди от ведущего моста на расстоянии 1,4 м.

Суммарную силу сопротивления передвижению с учетом преодолеваемого уклона и предельную силу тяги по критерию сцепления можно определить из выражений (24) и (25):

$$F_c = R_{\Sigma N} f_{\text{сп}} + M_{\Sigma} g \sin(-\beta); \quad (24)$$

$$F_T = (R_{bN} + R_{cN}) f_{\text{цп}}, \quad (25)$$

где F_c и F_T – сила суммарного сопротивления передвижению и сила предельной тяги по критерию сцепления соответственно; $R_{\Sigma N}$, R_{bN} и R_{cN} – суммарная нормальная опорная реакция и опорные нормальные реакции на ведущих колесах соответственно; $f_{\text{сп}}$ – коэффициент сопротивления перекачиванию; $f_{\text{цп}}$ – коэффициент предельного сцепления с опорной поверхностью; β – угол преодолеваемого уклона, (+) спуск, (–) подъем.

На рис. 4 показаны графики изменения силы сопротивления и предельной силы тяги в зависимости от преодолеваемого уклона для состояния комбайна с навешенным адаптером для коэффициента сопротивления перекачиванию равного 0,11 и коэффициента предельного сцепления равного 0,7.

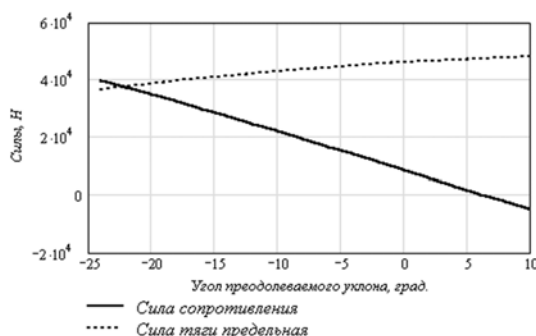


Рис. 4. Графики изменения силы сопротивления и предельной силы тяги (Н) в зависимости от угла преодолеваемого уклона (град) для состояния комбайна с навешенным адаптером

Для состояния с адаптером на тележке суммарную силу сопротивления передвижению с учетом преодолеваемого уклона можно определить из выражения (26):

$$Fc = (R_{\Sigma N} + (M_{ад} + M_{тел})g \cos(\beta)) \cdot f_{сп} + (M_{\Sigma} + M_{ад} + M_{тел})g \sin(-\beta), \quad (26)$$

где $M_{ад}$ и $M_{тел}$ – масса адаптера и масса тележки соответственно.

На рис. 5 показаны графики, аналогичные графикам на рис. 4, для состояния комбайна с адаптером на транспортной тележке.

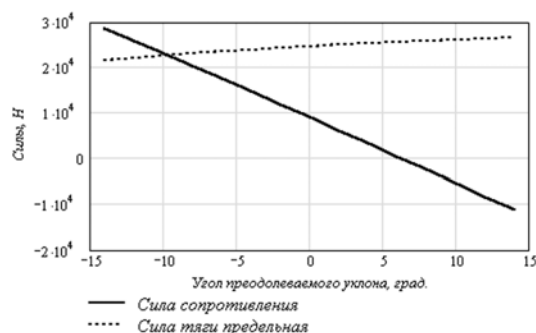


Рис. 5. Графики изменения силы сопротивления и предельной силы тяги (Н) в зависимости от угла преодолеваемого уклона (град) для состояния комбайна с адаптером на тележке

Анализируя графики, приведенные на рис. 4 и 5, можно заметить, что в состоянии с навешенным адаптером (рис. 4) по критерию ограничения сцепления ведущих колес с опорной поверхностью комбайн способен преодолевать подъем 22 градуса, а в состоянии с адаптером на тележке (рис. 5) равновесие между суммарной силой сопротивления передвижению и предельной силой сцепления достигается при преодолении подъема всего лишь 10 градусов.

Этот пример иллюстрирует, как сильно могут отличаться тягово сцепные свойства комбайна в зависимости от его состояния. И это необходимо учитывать при проектировании.

Необходимо также обратить внимание на то, что при наличии разноравесия по бортам, вызванного поперечным смещением центра тяжести и наличия межбортового дифференциала (или другого типа дифференцирования, например гидравлического), при нахождении предельной тяговой силы необходимо на коэффициент сцепления умножать не сумму реакций на ведущих колесах, а удвоенную реакцию на том ведущем колесе, на котором она имеет меньшую величину. Аналогичным образом необходимо оценивать тягово-сцепные свойства на поперечных уклонах, где происходит перераспределение реакций по бортам.

Заключение

1. При компоновке комбайна с целью обеспечения заданных параметров поперечной устойчивости необходимо учесть то, что увеличение высоты центра тяжести приводит к снижению поперечной устойчивости, поперечное смещение относительно продольной оси перераспределяет углы поперечной устойчивости по бортам, продольное смещение центра тяжести от ведущего моста к шарниру качания управляемого снижает поперечную устойчивость, а подъем шарнира качания увеличивает устойчивость.

2. Оценку продольной устойчивости и управляемости необходимо осуществлять по величине нагрузки на управляемый мост на горизонте и продольных уклонах. Для

обеспечения продольной устойчивости и управляемости, отсутствия галопирования достаточно обеспечить нагрузку на управляемый мост не менее 16 % от массы агрегата на горизонте и не менее 12 % на предельно допустимом продольном уклоне.

3. Для определения угла предельного подъема по критерию сцепления ведущих колес с опорной поверхностью необходимо определить суммарную силу сопротивления передвижению от сопротивления перекачиванию и сопротивления подъему, определить предельную силу сцепления ведущих колес с опорной поверхностью и найти угол продольного уклона, на котором эти силы уравниваются друг друга.

4. В случае имеющегося разноравесия по бортам, вызванного поперечным смещением центра тяжести, и при наличии дифференцированного привода ведущих колес определение предельной силы сцепления на уклоне необходимо осуществлять по удвоенной меньшей реакции из двух ведущих колес.

Использование предложенной методики на начальном этапе проектирования самоходного кормоуборочного комбайна позволяет подобрать такое распределение массы, параметры и расположение всего шлейфа адаптеров, которое, максимально используя все резервы принятой компоновочной схемы, обеспечивает удовлетворительные мобильные свойства во всех возможных состояниях.

Литература

1. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука ; Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981.
2. Чудаков, Д. А., Основы теории трактора и автомобиля / Д. А. Чудаков. – М. : Изд-во с.-х. лит., 1962.
3. Гуськов, В. В. Тракторы, теория / В. В. Гуськов. – М. : Машиностроение, 1988.
4. Скотников, В. А. Проходимость машин / В. А. Скотников, А. В. Пономарев, А. В. Климанов. – Минск : Наука и техника, 1982.

Получено 28.10.2013 г.

УДК 631.3-52:631.3.072.2

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМА НАВЕСКИ И ПЛУГА НА ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПАХОТНОГО АГРЕГАТА

В. Б. ПОПОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Работы, связанные с обработкой почвы мобильными энергетическими средствами (МЭС) – сельскохозяйственными тракторами или универсальными энергетическими средствами (рис. 1), являются наиболее энергоемкими тяговыми технологическими операциями. В растениеводстве такой операцией является пахота, представляющая рыхление почвы на глубину 0,20–0,27 м с допускаемыми по агротехническим требованиям отклонениями. Важной характеристикой навесного пахотного агрегата является положение мгновенного центра вращения (МЦВ) навесной машины в рабочем режиме [1]–[3], которое определяют устойчивость хода плуга, характер его заглубления в почву, нагрузка на опорном колесе и перераспределение нагрузки по осям МЭС.



Рис. 1. Пахотный агрегат на базе универсального энергетического средства УЭС-290/450

Основная часть

Цель работы – получить аналитические выражения для расчета координат МЦВ навесной машины, величины и направления силы сопротивления плуга, определить их связь с параметрами механизма навески (МН) и плуга.

Для построения МЦВ – P навесной машины в рабочем режиме в системе координат, связанной с задним колесом МЭС [4], проведем лучи через верхнюю – L_7 и нижнюю – L_{56} тяги МН (рис. 2). Чтобы определить координаты МЦВ, используем уравнения прямых, проходящих через верхнюю и нижние тяги внешнего четырехзвенника МН:

$$\frac{(X_P - X_{07})}{(X_{67} - X_{07})} = \frac{(Y_P - Y_{07})}{(Y_{67} - Y_{07})}, \quad \frac{(X_P - X_{05})}{(X_{56} - X_{05})} = \frac{(Y_P - Y_{05})}{(Y_{56} - Y_{05})}.$$

Совместное решение этих уравнений однозначно определяет МЦВ в зависимости от положения неподвижных и подвижных шарниров внешнего четырехзвенника МН:

$$X_P = \frac{(Y_{56}X_{05} - Y_{05}X_{56})(X_{07} - X_{67}) - (X_{05} - X_{56})(Y_{67}X_{07} - Y_{07}X_{67})}{(Y_{07} - X_{67})(X_{05} - X_{56}) - (X_{07} - X_{67})(Y_{05} - Y_{56})},$$

$$Y_P = X_P \frac{Y_{56} - Y_{05}}{X_{56} - X_{05}} + \frac{Y_{05}X_{56} - X_{05}Y_{56}}{X_{56} - X_{05}}.$$

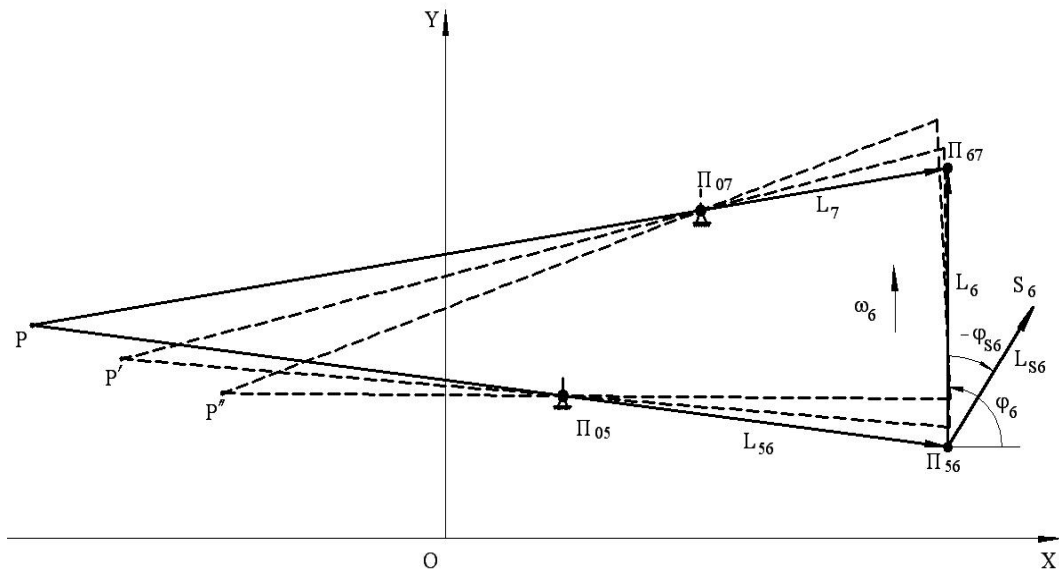


Рис. 2. Изменение положения полюса МЦВ при качании оси подвеса МН

Положение подвижных шарниров Π_{56} и Π_{67} и характерной точки S_6 – центра тяжести плуга (рис. 2), жестко связанной со звеном L_6 , определяется в результате выполнения процедуры геометрического анализа кинематической цепи, включающей МН и навесную машину [4].

На навесной плуг действуют: сила тяжести P_6 , приложенная в точке S_6 , сила сопротивления плуга R , приложенная в точке M , и сила реакции на опорном колесе Q , приложенная в точке N его контакта с почвой (рис. 3). Реакция на опорное колесо навесного плуга может быть определена из уравнения моментов упомянутых сил относительно МЦВ, для чего необходимо определить координаты характерных точек (S_6 , N , M).

Определение координат характерных точек плуга рассмотрим на примере характерной точки – центра тяжести плуга S_6 . Отметим, что координаты центра тяжести плуга (рис. 2, 3) относительно точки P определяются для рабочего положения оси подвеса – Π_{56} :

$$X_{S_6}(P) = |X_P| + X_{56} + L_{S_6} \cos(\varphi_6 + \varphi_{S_6});$$

$$Y_{S_6}(P) = |Y_P| + Y_{56} + L_{S_6} \sin(\varphi_6 + \varphi_{S_6}).$$

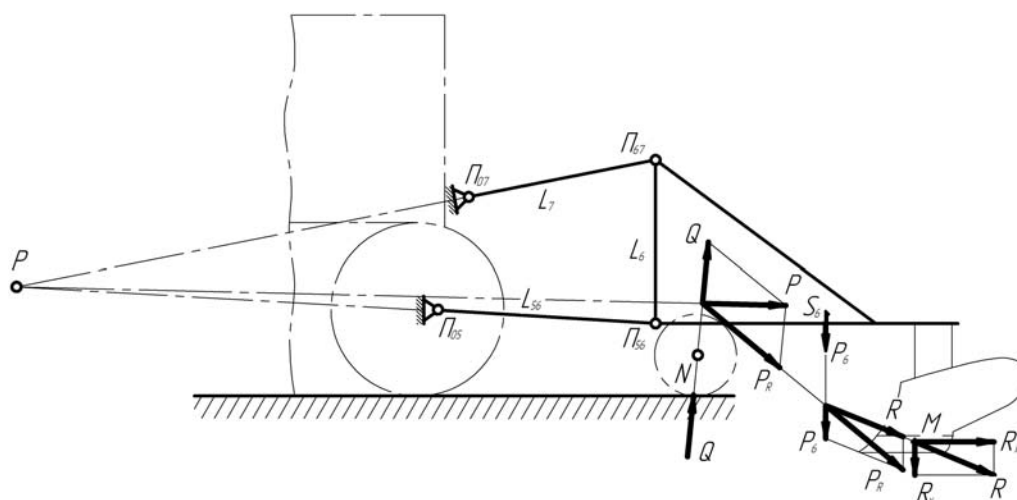


Рис. 3. Схема формирования силы сопротивления плуга

Определение координат других характерных точек N и M выполняется методически аналогично. В результате вертикальная составляющая силы Q рассчитывается по выражению

$$Q_Y = \frac{P_6 \cdot X_{S6}(P) + R_y \cdot X_M(P) - R_x \cdot Y_M(P)}{X_N(P) + \mu \cdot Y_N(P)},$$

где R_x и R_y — компоненты обобщенного сопротивления рабочих органов плуга.

С учетом потерь на перекачивание опорного колеса, учитываемых горизонтальной составляющей Q_x , величина силы Q определяется по выражению

$$Q = Q_Y \sqrt{1 + \mu^2},$$

где μ — коэффициент сопротивления перекачиванию.

Сила P_R , учитывающая совместное действие силы тяжести и обобщенного сопротивления рабочих органов плуга, определяется по выражению

$$P_R = \sqrt{(P_6^2 + R^2 + 2P_6 \cdot R \cdot \sin(\theta))},$$

где θ — угол между силами R и R_x .

В результате сила тягового сопротивления движению пахотного агрегата P определяется из параллелограмма сил (рис. 3) по выражению

$$P = \sqrt{(Q^2 + P_R^2 - 2Q \cdot P_R \cos \beta)},$$

где β — угол между силами Q и P_R .

Сила тягового сопротивления P действует под углом α к горизонту, который определяется по выражению

$$\alpha = \arctg \left[\frac{\sin(\varphi_5 - \varphi_7)}{\cos \varphi_5 \cdot \cos \varphi_7} \right],$$

где φ_7 и φ_5 — углы, образуемые верхней — L_7 и нижней — L_{56} тягами МН в системе координат, связанной с задним колесом МЭС (рис. 2, 3).

Плечо действия силы тягового сопротивления P рассчитывается по выражению

$$\rho = Y_p \cos \alpha - (X_p - \mu r'') \sin \alpha,$$

где r'' – радиус заднего колеса МЭС.

Из приведенных выражений очевидна связь ориентации силы тягового сопротивления P и величины его плеча ρ с координатами шарниров внешнего четырехзвенника МН, а также с размерами и ориентацией его верхней и нижней тяг.

Процедура силового анализа выполняется для структурной единицы плоского аналога МН с целью определения действующих в ее шарнирах сил. Группа Ассур состоит из верней тяги – L_7 и стойки – L_6 (высоты присоединительного треугольника), имитирующей плуг, к которой приложены все силы – веса плуга, сопротивления почвы и реакции почвы на опорное колесо.

Расчетная схема, в которую входит двухповодковая группа L_7 – L_6 (рис. 4), описывается математической моделью, представленной системой из четырех алгебраических уравнений.

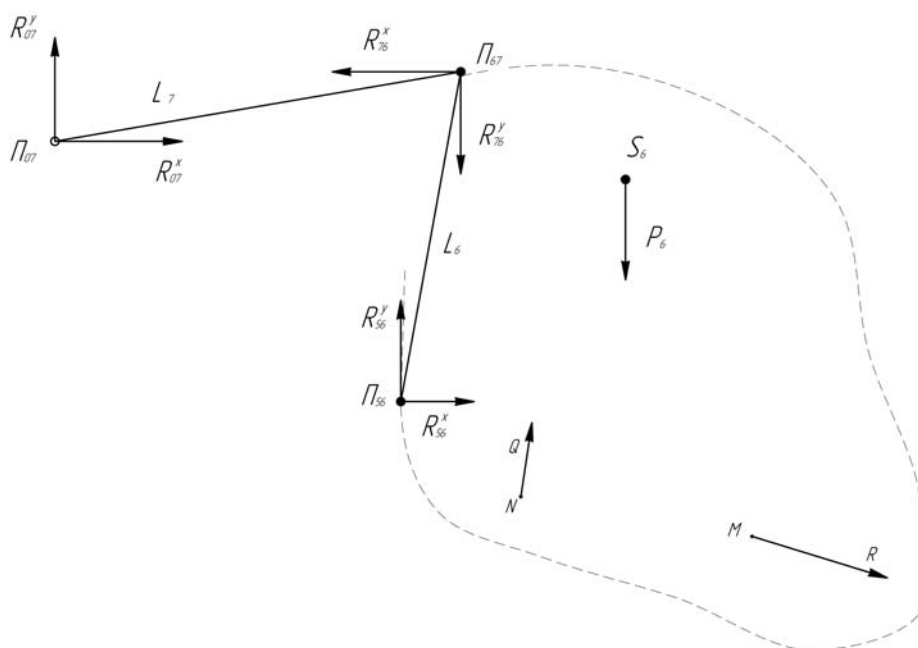


Рис. 4. Расчетная схема нагруженной двухповодковой группы Ассур

Уравнения описывают состояние равновесия действующих на группу сил и моментов, приложенных относительно шарнира Π_{67} . При этом на плоскости сила в шарнире Π_{56} фактически представляет две составляющие, разделенные поровну по шарнирам двух нижних тяг МН.

$$\begin{cases} R_{07}^x + 2R_{56}^x = Q_X + R_X; \\ R_{07}^y + 2R_{56}^y = Q_Y - P_6 - R_Y; \\ R_{07}^x(Y_{67} - Y_{07}) + R_{07}^y(X_{07} - X_{67}) = R_X(Y_{67} - Y_M) + Q_X(Y_{67} - Y_N); \\ 2R_{56}^x(Y_{67} - Y_{56}) + 2R_{56}^y(X_{56} - X_{67}) = Q_Y(X_N - X_{67}) - P_6(X_{S6} - X_{67}) - R_Y(X_M - X_{67}). \end{cases}$$

Система из 4-х уравнений имеет 4 неизвестных и решается подстановкой либо по методу Крамера. Для упрощения вида выражений реакций в шарнирах использу-

ем промежуточные переменные: для преобразований координат, а также сил и моментов, действующих на плуг:

$$d = Y_{67} - Y_{56}, \quad e = X_{56} - X_{67}, \quad f = Y_{67} - Y_{07}, \quad g = X_{07} - X_{67}, \quad A = e \cdot f - d \cdot g,$$

$$M_{R_x} = R_x(Y_{67} - Y_M), \quad M_{Q_x} = Q_x(Y_{67} - Y_N), \quad M_{R_y} = R_y(X_M - X_{67}), \quad M_6 = P_6(X_{56} - X_{67}),$$

$$X = Q_x + R_x, \quad Y = Q_y - P_6 - R_y, \quad M_x = M_{R_x} + M_{Q_x}, \quad M_y = M_{Q_y} - M_6 - M_{R_y}.$$

Результаты решения системы уравнений приведены ниже:

$$R_{56}^x = \frac{(Xf + Yg)e}{2A} - \frac{M_y g + M_x e}{2A}; \quad R_{56}^y = \frac{(M_y - Xd)f}{2A} + \frac{(M_x - Yg)d}{2A};$$

$$R_{07}^y = \frac{1}{A}[M_y g + M_x e - (Xd + Ye)g]; \quad R_{07}^x = \frac{1}{A}[(Xd + Ye)f - (M_x d + M_y f)].$$

Величина общей реакции в шарнирах определяется по известному правилу – геометрической сумме векторов:

$$R_{56} = \sqrt{(R_{56}^x)^2 + (R_{56}^y)^2}; \quad R_{07} = \sqrt{(R_{07}^x)^2 + (R_{07}^y)^2}.$$

Расчетная схема статической устойчивости пахотного агрегата (рис. 5) учитывает вес МЭС $P_{МЭС}$, силу сопротивления P , приложенную на крюке или к навеске МЭС под углом α к горизонту, и опорные реакции колес Z'_A и Z''_A , приложенные на расстоянии μr от опорной точки колеса.

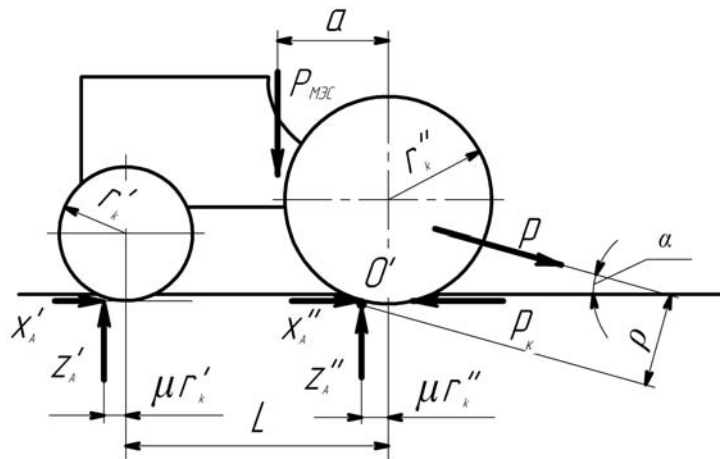


Рис. 5. Расчетная схема нагрузок агрегата с работающим плугом: $r'r''$ – радиусы колес переднего и заднего соответственно; $X'_A = \mu Z'_A$ и $X''_A = Z''_A$ – сопротивление перекачиванию передних и задних колес МЭС; α – угол наклона к горизонту силы P

Искомые силами являются вертикальные нагрузки на колеса МЭС Z'_A и Z''_A , а также касательная сила P_k :

$$P_k = X'_A + X''_A + P \cos \alpha,$$

где X'_A и X''_A – сопротивление перекачиванию передних и задних колес МЭС; α – угол наклона к горизонту силы P .

Вначале определяют нагрузку на передние колеса МЭС Z'_A из уравнения моментов сил, действующих на МЭС, относительно точки O' :

$$Z'_A = \frac{P_{\text{МЭС}}(a - \mu r''_k) - P\rho}{L + \mu(r'_k - r''_k)},$$

где r'_k и r''_k – радиусы качения колес МЭС; ρ – плечо силы P относительно точки O' ; μ – коэффициент сопротивления перекачиванию колес МЭС.

Соотношение между вертикальными Z'_A и Z''_A и горизонтальными силами X'_A и X''_A зависит от значения коэффициента сопротивления перекачиванию колес МЭС, который принимают одинаковым для передних и задних колес и постоянным по величине для данного поля (не зависящим от величины вертикальной нагрузки на колесо), т. е. $X'_A = \mu Z'_A$ и $X''_A = \mu Z''_A$.

Затем по этой же формуле определяют нагрузку Z'_{AO} на передние колеса МЭС при отсутствии плуга, т. е. при $P = 0$.

Условие устойчивости требует, чтобы при работе с плугом значение нагрузки на передние колеса МЭС сохранялось не менее допустимого значения, необходимого для обеспечения управляемости агрегата:

$$Z'_{AO} / Z'_A \geq \eta_{\min}.$$

Значение $\eta_{\min}$ определяет завод-производитель трактора или универсального энергетического средства. Обычно значение $\eta_{\min} = 0,4-0,6$ в зависимости от конструкции МЭС и вида работ.

Для определения силы Z''_A может быть использовано условие $\sum Z = 0$, согласно которому

$$Z''_A = G_T + P \sin \alpha - Z'_A.$$

Составляя уравнение $\sum Z = 0$ и решая его относительно P_k , найдем:

$$P_k = \mu(Z'_A + Z''_A) + P \cos \alpha.$$

Заключение

В ходе проделанной работы были получены аналитические выражения для расчета положения МЦВ навесной машины, однозначно связанные с параметрами МН. Это позволяет оперативно оценивать тот или иной вариант МН МЭС на его соответствие техническим требованиям [5], [6] при агрегатировании с плугом в рабочем режиме.

Выражения для расчета величины и направление силы сопротивления движению пахотного агрегата и аналитически определенное плечо действия этой силы позволяют в режиме автоматизированного проектирования выполнить многовариантный анализ нормальных реакций на движителях МЭС.

Если полученные в результате расчета значения нормальных реакций Z'_A и Z''_A не обеспечивают управляемости на передних колесах или требуемого сцепления с почвой задних колес МЭС, то следует изменить точку приложения и направление силы тяги P . Это может быть достигнуто изменением: конфигурации внешнего четырехзвенника МН, высоты присоединительного треугольника или положения опорного колеса плуга.

Литература

1. Синеоков, Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков. – М. : Машиностроение, 1977. – 326 с. : ил.
2. Чудаков, Д. А. Основы теории и расчета трактора и автомобиля : учеб. пособие / Д. А. Чудаков. – М. : Колос, 1975. – 384 с.
3. Скотников, В. А. Основы теории и расчета трактора и автомобиля / В. А. Скотников, А. А. Машенский, А. С. Солонский ; под ред. В. А. Скотникова. – М. : Агропромиздат, 1986. – 383 с. : ил.
4. Попов, В. Б. Функциональная математическая модель анализа подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В. Б. Попов // Механика – 2011 : сб. науч. тр. V Белорус. конгресса по теорет. и приклад. механике / Объедин. Ин-т машиностроения НАН Белоруси ; редкол.: М. С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 169–176 (Справочник по с/х машинам).
5. ГОСТ 10677–2001. Устройство навесное заднее сельскохозяйственных тракторов классов 0,6–8. Типы, основные параметры и размеры (Межгосударственный стандарт). – Минск, 2002. – С. 8.
6. ГОСТ 12.2.111–85. Система стандартов безопасности труда. Машины сельскохозяйственные навесные и прицепные. Общие требования безопасности (Межгосударственный стандарт). – Минск, 2006. – С. 10.

Получено 08.11.2013 г.

УДК 533.9.01

ОТРАЖЕНИЕ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ ОТ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Р. С. ВАРДАНЯН, С. И. МЕДВЕДИЦКОВ

Учреждение образования «Бобруйский филиал

Белорусского государственного экономического университета»

Введение

Теория переноса излучения в оптически однородных средах достаточно хорошо разработана и является одним из важных разделов математической физики и теоретической астрофизики [1], [2].

Реальные астрофизические объекты, где рассматривается диффузия излучения, являются оптически неоднородными. Это скорее правило, чем исключение. Вследствие флуктуаций концентраций атомов, ионов, свободных электронов, температуры, оптические параметры среды, такие как коэффициент поглощения, альбедо рассеяния и другие, являются случайными функциями (полями), т. е. среда является случайно неоднородной (стохастической). Более или менее систематическое исследование процесса диффузии излучения в стохастических средах началось в конце прошлого века (например, [3]–[6]). Сложность задач переноса в стохастических средах вынуждает применить совершенно разные методы и математические модели случайного поля: принцип инвариантности [4], вероятностный метод [5], метод диаграммной техники Фейнмана [6]–[8].

Сравнение результатов, полученных разными методами, дает возможность более точно оценить влияние флуктуаций на процесс диффузии излучения. Во всех перечисленных работах рассматриваются стационарные задачи переноса.

В данной работе получено замкнутое уравнение относительно условной вероятности отражения кванта от нестационарной стохастической среды с учетом времени нахождения атома в возбужденном состоянии и времени нахождения кванта в пути. Предполагается, что вероятность выживания кванта (альбедо) является случайным полем.

Отметим, что рассмотренная задача, помимо астрофизических применений, может быть востребованной в области радиационной защиты населения. Такая задача, насколько известно авторам, рассматривается впервые.

Закон переизлучения кванта

Предположим, что среда состоит из двухуровневых атомов, свободных электронов и ионов. Будем рассматривать диффузию монохроматического излучения. В линейном приближении возбужденный атом может перейти в основное состояние либо спонтанно (излучив фотон), либо вследствие электронных ударов второго рода, не излучив при этом фотон.

Вероятность dp_0 перехода возбужденного атома в основное состояние за время dt не зависит от t , и задается выражением: $dp_0 = \beta dt$, ($\beta = A_{21} + a_{21}$), а вероятность dp_1 радиативного перехода за время dt будет $dp_1 = \gamma dt$, $\gamma = A_{21}$, где A_{21} – эйнштейновский коэффициент спонтанных переходов, a_{21} – коэффициент деактивации атома вследствие электронных ударов. Переизлучение кванта возбужденным атомом является пуассоновским процессом (например, [9]), следовательно, вероятность $P(t)$ того,

что возбужденный в момент времени $t = 0$ атом не совершит никаких переходов в интервале времени $(0, t)$, т. е. «доживет» до момента времени t , будет:

$$P(t) = e^{-\beta t}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что вероятность $dp(t)$ радиативного перехода в интервале времени $(t, t + dt)$ будет:

$$dp(t) = \gamma e^{-\beta t} dt; \quad \int_0^{\infty} dp = \frac{A_{21}}{A_{21} + a_{21}} = \lambda, \quad (2)$$

где λ – альбеда рассеяния.

Коэффициент деактивации a_{21} обычно представляется в виде (например, [2]): $a_{21} = n_e C_{21}(T)$, где n_e – концентрация свободных электронов, T – температура электронной подсистемы.

Если n_e или T флуктуируют, то $\beta = A_{21} + n_e C_{21}(T)$ также будет случайной величиной в каждой точке среды. Для дальнейшего изложения удобно считать, что β зависит от некоторого параметра u , который является случайным полем $u = U(\vec{r})$, где $\vec{r}$ – радиус-вектор точки. Например, за u можно взять флуктуационную часть электронной концентрации $u \equiv \tilde{n}_e = n_e - \langle n_e \rangle$, где $\langle n_e \rangle$ – среднее значение n_e .

Будем предполагать, что поле $U(\vec{r})$ является гаусс-марковским случайным полем. Пусть $g(\vec{r} - \vec{r}'; u; u')$ плотность распределения условной вероятности u' в точке $\vec{r}'$, при условии что $U(\vec{r}) = u$.

В работах [4], [5] показано, что в трехмерных задачах и в одномерном приближении к трехмерным задачам, при выполнении условия марковости случайного поля U вдоль траектории кванта $g(\vec{r} - \vec{r}'; u; u')$ порождает полугруппу оператор-функции $\hat{G}(r)$:

$$[\hat{G}(r)f](u) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(r; u; u') f(u') du', \quad r = |\vec{r} - \vec{r}'|, \quad \hat{G}(0) = I, \quad (3)$$

где I – единичный интегральный оператор. Это следует из свойства функции g :

$$g(0; u; u') = \delta(u - u'), \quad (4)$$

где $\delta(u - u')$ – дельта функция Дирака.

Пусть $\hat{M}$ инфинитезимальный оператор полугруппы $\hat{G}$:

$$\hat{M} = \frac{d\hat{G}}{dr} / r = +0. \quad (5)$$

Известно (например: [5], [9]), что для гауссовского поля

$$\hat{M} = \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial u^2}; \quad \varepsilon = \sigma^2 / l, \quad (6)$$

где σ^2 – дисперсия u ; l – радиус корреляции.

Уравнение относительно условной вероятности тращения кванта от среды

Перейдем от геометрической глубины точки x к оптической глубине

$$\tau = \alpha x,$$

где α – коэффициент поглощения света.

Пусть в момент времени $t = 0$ на границу одномерного слоя $[0; \tau_0]$ падает один квант. Пусть $P(\tau_0; t; u)dt$ – условная вероятность того, что после диффузии квант выйдет из среды со стороны границы $\tau = 0$ в интервале времени $(t; t + dt)$ при условии, что $U(0) = u$. Следовательно, $P(\tau_0; t; u)$ имеет смысл плотности распределения вероятностей.

Выделим из среды $[0; \tau_0]$ подслой $\Pi_1[0; \Delta\tau]$, а оставшуюся часть $[\Delta\tau; \tau_0]$ обозначим через Π_2 . Отметим, что вероятность поглощения кванта в слое $\Delta\tau$ равна $\Delta\tau$, следовательно, вероятность того, что квант пройдет слой $\Delta\tau$, будет $(1 - \Delta\tau)$.

При составлении уравнения относительно $P(\tau_0; t; u)$ применяется метод сложения слоев (например: [4], [8]), но с учетом временной зависимости вероятности отражения кванта от среды. Плотность вероятности $P(\tau_0; t; u)$ складывается из вероятностей следующих процессов:

1. Квант проходит подслой Π_1 с вероятностью $(1 - \Delta\tau)$, отражается от Π_2 , повторно проходит Π_1 и выходит из среды в интервале времени $(t; t + dt)$. В точке $\Delta\tau$ параметр u может принимать любое значение u' в интервале $(u'; u' + du')$ с вероятностью $g(\Delta\tau; u; u')du'$ (так как в точке $\tau = 0$, $U = u$). Далее, при прохождении подслоя $\Delta\tau$ дважды (туда и обратно) квант тратит время $\Delta t = \frac{2\Delta\tau}{g}$. Следовательно, вероятность dP_1 выхода кванта из среды, с учетом времени задержки в пути и с учетом, что квант отражается от Π_2 толщиной $\tau_0 - \Delta\tau$, будет:

$$dP_1 = (1 - \Delta\tau)^2 g(\Delta\tau; u; u') P(\tau_0 - \Delta\tau; t - \frac{2\Delta\tau}{g}; u') du'.$$

Интегрируя по u' , окончательно получим:

$$P_1(\tau_0; t; u) = (1 - \Delta\tau)^2 \int_{-\infty}^{+\infty} g(\Delta\tau; u; u') P(\tau_0 - \Delta\tau; t - \frac{2\Delta\tau}{g}; u') du', \quad (7)$$

где g – скорость света в единицах оптической толщины.

2. Квант с вероятностью $\Delta\tau$ поглощается в подслое Π_1 в момент $t = 0$, по закону (2) переизлучается назад в интервале времени $(t; t + dt)$ и с вероятностью $1 - \Delta\tau$ выходит из среды. С точностью до слагаемых порядка $\Delta\tau$ вероятность этого процесса с учетом (2), (4) будет:

$$P_2 = \Delta\tau \frac{\gamma}{2} e^{-\beta t}; \quad \beta = \beta(u). \quad (8)$$

3. Квант поглощается в Π_1 в момент времени $t = 0$, переизлучается вперед в интервале времени $(t'; t' + dt')$, где $t' \in (0; t)$, отражается от Π_2 в интервале времени $(t; t + dt)$ и выходит из среды. С точностью до членов порядка $\Delta\tau$ вероятность этого процесса:

$$P_3 = \Delta\tau \frac{\gamma}{2} \int_0^t P(\tau_0; t-t'; u) e^{-\beta t'} dt'. \quad (9)$$

4. Квант проходит подслон Π_1 , отражается от Π_2 в интервале времени $(t'; t' + dt')$, поглощается в Π_1 , переизлучается в интервале времени $(t; t + dt)$ и выходит из среды. Вероятность этого процесса:

$$P_4 = \Delta\tau \frac{\gamma}{2} \int_0^t P(\tau_0; t'; u) e^{-\beta(t-t')} dt'. \quad (10)$$

5. Квант проходит Π_1 , отражается от Π_2 в интервале времени $(t''; t'' + dt'')$, поглощается в Π_1 , переизлучается назад к Π_2 в интервале времени $(t'; t' + dt')$, повторно отражается от Π_2 в интервале времени $(t; t + dt)$ и выходит из среды. Вероятность этого процесса:

$$P_5 = \Delta\tau \frac{\gamma}{2} \int_0^t dt'' P(\tau_0; t''; u) \int_{t''}^t e^{-\beta(t'-t'')} P(\tau_0; t-t'; u) dt'. \quad (11)$$

Отметим, что во всех слагаемых мы должны сохранить члены порядка $\Delta\tau$, так как в дальнейшем следует совершить предельный переход $\Delta\tau \rightarrow 0$. Поэтому члены типа $\Delta\tau P(\tau_0 - \Delta\tau; t - \frac{\Delta\tau}{9}; u)$ были заменены выражением $\Delta\tau P(\tau_0; t; u)$. По той же причине выражения типа $\Delta\tau \int_{-\infty}^{\infty} g(\Delta\tau; u; u') f(u') du'$ были заменены на $\Delta\tau f(u)$, так как

$$\begin{aligned} \Delta\tau \int_{-\infty}^{\infty} f(u') g(\Delta\tau; u; u') du' &= \Delta\tau \int_{-\infty}^{\infty} f(u') g(0; u; u') du' = \\ &= \Delta\tau \int_{-\infty}^{\infty} f(u') \delta(u - u') du' = \Delta\tau f(u). \end{aligned}$$

Сложив выражения P_i (7)–(11) и совершив предельный переход $\Delta\tau \rightarrow 0$, с учетом формул (3)–(5) получим следующее уравнение относительно $P(\tau_0; t; u)$:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau_0} - \hat{M}P + \frac{2}{9} \frac{\partial P}{\partial t} + 2P = F[P; u; t], \quad (12)$$

а для гауссовского поля, с учетом (6):

$$\frac{\partial P}{\partial \tau_0} - \varepsilon \frac{\partial^2 P}{\partial u^2} + \frac{2}{9} \frac{\partial P}{\partial t} + 2P = F[P; u; t], \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} F &= \frac{\gamma}{2} e^{-\beta(u)t} \gamma \int_0^t e^{-\beta(u)(t-t')} P(\tau_0; t'; u) dt' + \\ &+ \frac{\gamma}{2} \int_0^t dt' \int_0^{t-t'} e^{-\beta(u)t} + \gamma \int_0^t e^{-\beta(u)(t-t')} P(\tau_0; t'; u) dt''. \end{aligned} \quad (14)$$

К уравнениям (12), (13) следует присоединить граничные условия:

$$P(0; t; u) = P(\tau_0; 0; u) = 0. \quad (15)$$

В случае полубесконечной среды ($\tau_0 = \infty$) вместо уравнения (13) получим уравнение относительно $P(t; u)$:

$$\frac{2}{9} \frac{\partial P}{\partial t} - \varepsilon \frac{\partial^2 P}{\partial u^2} + 2P = F[P; u; t]; \quad (16)$$

$$P(0; u) = 0.$$

Итак, удастся получить замкнутое уравнение относительно условной вероятности отражения от стохастической среды.

Пусть $\varphi(u)$ – плотность распределения вероятностей случайной величины $u = U(0)$.

Тогда безусловная плотность вероятности отражения кванта от среды в момент времени t будет:

$$P(\tau_0 t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(u) P(\tau_0; t; u) du. \quad (17)$$

Как и следовало ожидать, относительно неизвестной функции $P(t; u)$ получается довольно сложное интегро-дифференциальное уравнение параболического типа. Если считать, что стохастическая среда мало отличается от однородной, т. е. либо малая дисперсия σ^2 поля, либо большой радиус l корреляции поля, т. е. считать, что $\varepsilon = \frac{\sigma^2}{l}$ малый параметр, то решение (6) можно искать в виде разложения в степенной ряд по степеням ε : $P(t; u) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k \varepsilon^k$. Относительно нулевого приближения $P_0(t; u)$ получается уравнение:

$$\frac{2}{9} \frac{\partial P_0(t; u)}{\partial t} + 2P_0 = F[P_0; u; t]. \quad (18)$$

Относительно остальных приближений P_i также получаются уравнения такого типа. Так как правые части полученных уравнений являются свертками, то такие уравнения эффективно можно решить преобразованием Лапласа. Предполагается результаты этих вычислений изложить в отдельной статье.

Чтобы выяснить, хотя бы качественно, как влияют флуктуации альбедо на отражательную способность среды, рассмотрим следующую частную задачу. Будем считать, что вероятность λ выживания кванта (2) является гауссовским полем, т. е. $\lambda = u$, далее не будем учитывать время нахождения атома в возбужденном состоянии и будем считать, что скорость света $9 = \infty$. Тогда вместо уравнения (16) для полубесконечной среды получим:

$$-\varepsilon \frac{\partial^2 P(\lambda)}{\partial \lambda^2} = \frac{\lambda}{2} - (2 - \lambda)P(\lambda) + \frac{\lambda}{2} P^2(\lambda). \quad (19)$$

Ищем решение (19) в виде разложения по степеням ε :

$$P(\lambda) = \sum_{k=0}^{\infty} \varepsilon^k P_k(\lambda). \quad (20)$$

Подставляя (20) в (19), относительно $P_0(\lambda)$ вместо (18), получим квадратное уравнение:

$$\frac{\lambda}{2} P_0^2 - (2 - \lambda) P_0 + \frac{\lambda}{2} = 0. \quad (21)$$

Решение этого уравнения:

$$P_0 = \frac{1 - \sqrt{1 - \lambda}}{1 + \sqrt{1 - \lambda}} \equiv \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha}, \quad \alpha = \sqrt{1 - \lambda}. \quad (22)$$

Это известное в теории переноса излучения выражение коэффициента отражения от полубесконечной однородной среды с $\lambda = \text{const}$. Для следующего приближения $P_1(\lambda)$ получим выражение:

$$P_1(\lambda) = -\frac{1}{\alpha} \frac{d^2 P_0}{d\lambda^2}. \quad (23)$$

Пропуская промежуточные выкладки, приведем окончательное выражение для P_1 :

$$P_1 = \frac{1 + 2\alpha}{2\alpha^4 (1 + \alpha)^3}. \quad (24)$$

Следовательно, в первом приближении:

$$P(\alpha) \approx P_0 + \varepsilon P_1 = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} + \varepsilon \frac{1 + 2\alpha}{2\alpha^4 (1 + \alpha)^3}, \quad \alpha = \sqrt{1 - \lambda}. \quad (25)$$

Рассмотрим численный пример. Пусть $\lambda = 0,96$, $\alpha = 0,2$, $\varepsilon = 0,0004$. Это реалистичные данные. Тогда коэффициент отражения увеличивается на 15 %. Оказывается, что даже симметрические флуктуации λ приводят к заметному увеличению коэффициента отражения. Более строгое доказательство этого утверждения можно найти в статье [8].

Заключение

Таким образом, можно сформулировать следующее правило учета флуктуаций параметра $\beta = \beta(u)$ при составлении уравнения относительно условной вероятности отражения $P(\tau_0; t; u)$ методом сложения слоев (или с помощью принципа инвариантности): следует в соответствующих уравнениях для однородной среды оператор $\frac{\partial}{\partial \tau_0} + \frac{2}{\partial} \frac{\partial}{\partial t}$ заменить оператором $\frac{\partial}{\partial \tau_0} + \frac{2}{9} \frac{\partial}{\partial t} - \hat{M}$, или $\frac{\partial}{\partial \tau_0} + \frac{2}{9} \frac{\partial}{\partial t} - \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial u^2}$. Это общее правило. Следует отметить, что в аналогичных стационарных задачах (например: [4], [5], [8]) эта замена, т. е. учет флуктуации альбедо, приводит к существенному увеличению коэффициента отражения.

Литература

1. Соболев, В. В. Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет / В. В. Соболев. – М. : Гостехиздат, 1956. – 332 с.
2. Михалас, Д. Звездные атмосферы / Д. Михалас. – М. : Мир, 1982.

3. Енгибарян, Н. Б. Звезды, туманности, галактики / Н. Б. Енгибарян, А. Г. Никогосян. – Ереван : Изд-во АН Арм. ССР, 1969.
4. Варданян, Р. С. О задачах переноса в стохастических средах / Р. С. Варданян, Н. Б. Енгибарян // Принцип инвариантности и его приложения // Тр. симпозиума. – Ереван : Изд-во АН Арм. ССР, 1981. – С. 203–209.
5. Варданян, Р. С. Применение вероятностного метода к задачам переноса в стохастических средах / Р. С. Варданян, Н. Б. Енгибарян // *Астрофизика*. – 1989. – Т. 31, вып. 1. – С. 162–176.
6. Vardanian, R. S. Radiation Transfer in Stochastic Media / R. S. Vardanian // *Astrophysics and Space Science*. – 1988. – Vol. 141. – P. 375–387.
7. Варданян, Р. С. Корреляционные характеристики поля излучения в стохастической среде / Р. С. Варданян // *Вес. Нац. акад. наук. Беларусі, сер. фіз.-мат. навук*. – 2002. – № 1. – С. 90–94.
8. Варданян, Р. С. Характеристики поля излучения в полубесконечной стохастической среде / Р. С. Варданян // *Вес. Нац. акад. наук. Беларусі, сер. фіз.-мат. навук*. – 2012. – № 1. – С. 55–61.
9. Вентцель, А. Д. Курс теории случайных процессов / А. Д. Вентцель. – М. : Наука, 1975. – 512 с.

Получено 24.05.2013 г.

УДК 697.34

**ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ПОТОКОВ ОТ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ВОЗДУХА
В СИСТЕМЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО ОХЛАЖДЕНИЯ
ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ****В. Д. ПЕТРАШ, И. В. ЧЕРНЫШЕВА***Учреждение образования «Одесская государственная
академия строительства и архитектуры», Украина***Введение**

Использование вторичных энергоресурсов (ВЭР), большие резервы которых имеются в промышленности производства строительных материалов в обжиговых печах, позволяет значительно повысить энергоэкономические, экологические и технологические характеристики промышленного и коммунально-бытового теплоснабжения. В наиболее энергоемких печах производства вяжущих и стеновых материалов коэффициент использования топлива в 2–3 раза меньше, чем в генераторах традиционного теплоснабжения. Потери теплоты в окружающую среду с боковой поверхности обычно не укрытой печи достигают 6–7 кВт/м². При этом эффективность сжигания топлива в таких агрегатах не превышает 40 %, а потери теплоты с боковой поверхности достигают 10–30 % его общего расхода. Рациональное использование этого ресурса может значительно повысить энергоэкономичность промышленного теплоснабжения с соответствующим снижением загрязнения окружающей среды.

Весьма перспективным является применение теплонасосных технологий для энергосбережения в процессах производства строительных материалов во вращающихся печах с утилизацией низкотемпературных газоздушных потоков. Логично, что минимизация термотрансформаторной компоненты в общем энергетическом потоке должна быть доминирующей в энергосбережении на этой основе. Следует отметить, что стабилизация установленного [1] теплового режима охлаждения печи в течение года является важной технико-экономической задачей, направленной на улучшение теплотехнического процесса и энергосбережение, прежде всего для зоны обжига.

Основная часть

С позиции более эффективного использования энергии стабилизирующего охлаждения печи недостатком ранее рассмотренной системы [2], [3] для промышленного теплоснабжения является то, что в указанной системе отсутствует функциональная возможность одновременной утилизации теплоты и использования энергии многочисленных вторичных и возобновляемых низкотемпературных источников.

Результатами исследования [3], [5] установлена целесообразность увеличения тепловой мощности разрабатываемых систем теплоснабжения за счет расширения использования энергетического ресурса низкопотенциальных источников в совмещенном процессе стабилизирующего охлаждения боковой поверхности вращающейся печи.

Система промышленного теплоснабжения (рис. 1) разработана [6] на основе усовершенствованной структурно-функциональной взаимосвязи ее исходных элементов. Поэтому главной целью в разработке и исследовании предложенной системы

(рис. 1) явилось повышение технико-экономической эффективности теплоснабжения с расширением использования энергетического ресурса за счет увеличения глубины доохлаждения теплоносителя низкопотенциальных источников и повышения надежности работы термотрансформаторного контура.

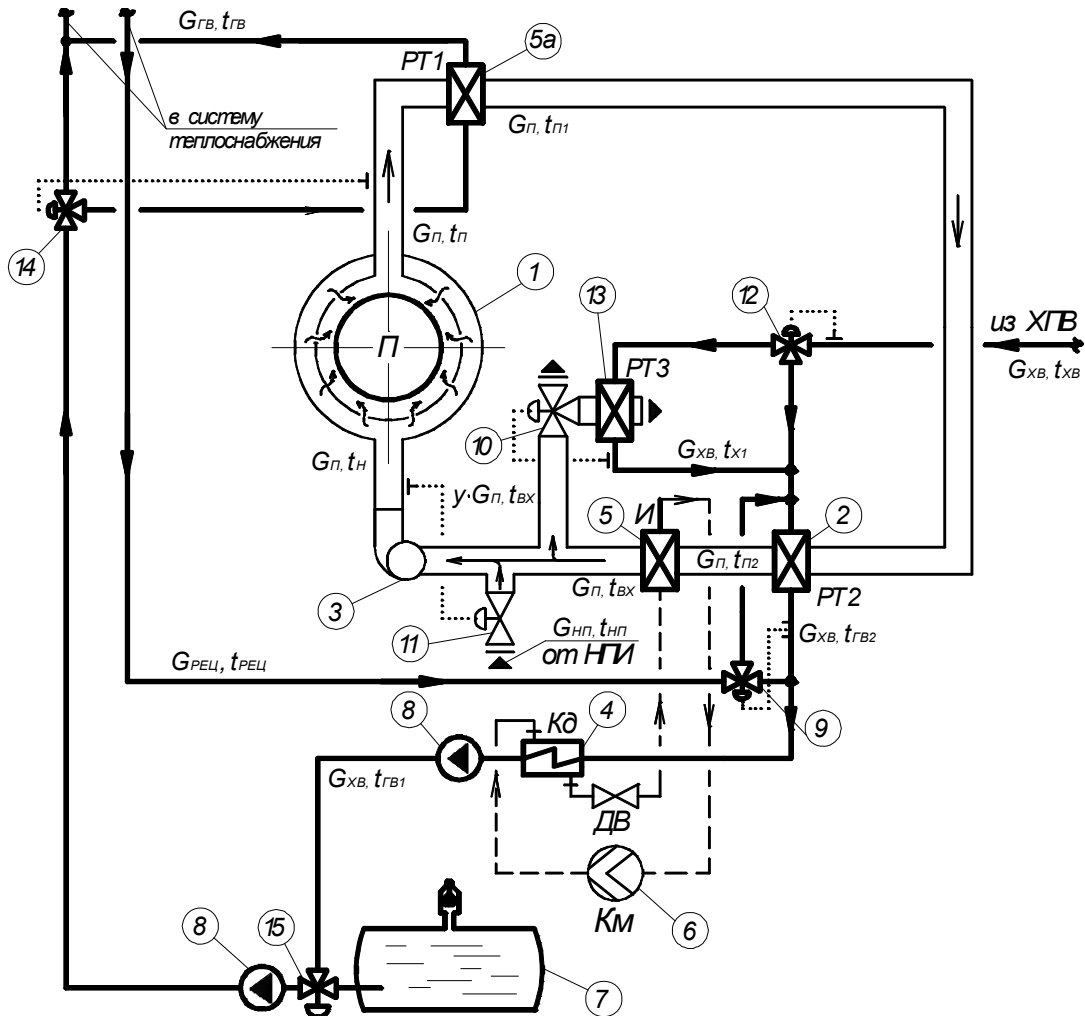


Рис. 1. Система теплоснабжения на основе термотрансформированной энергии стабилизирующего охлаждения печи и переохлаждения теплоносителя низкопотенциальных источников:

- 1 – укрытие печи; 2 – калорифер; 3 – вентилятор; 4 – конденсатор; 5 – испаритель;
 6 – компрессор; 7 – бак-аккумулятор; 8 – насосы; 9 – регулятор расхода;
 10, 11 – соответственно, сбросной и заборный патрубки с трехходовыми регуляторами расхода; 12, 14, 15 – трехходовый регулятор расхода;
 13 – рекуперативный теплообменник

Исходная начальная вода из холодного питьевого водопровода с начальной температурой, которая в разные периоды года имеет различную температуру (5–25 °C), с помощью насоса 8 проходит через трехходовой регулятор расхода 12 и рекуперативный теплообменник 13, где охлаждается до температуры 2–5 °C за счет действия переохлажденной сбросной части циркулирующего энергоносителя в испарительном теплообменнике 5. Это позволяет снизить температуру начальной воды, температура которой в теплый период года достигает 25 °C (преимущественно в южных регионах Украины), после чего она поступает в калорифер 2. После охлаждения печи горячий воздух из теплообменника 5а поступает в калорифер 2 и нагревает воду.

Охлажденный рециркуляционный воздух после калорифера 2 с прохождением через испарительный теплообменник 5 доохлаждается, в том числе до уровня отрицательных температур, а после прохождения через патрубок 10 и охлаждения начальной воды до 2–5 °С удаляется в атмосферу и заменяется теплым газовоздушным потоком от низкпотенциальных источников, поступая через заборный патрубок 11.

Автоматизированный процесс смешения переохлажденной части рециркуляционного потока и поступающего газовоздушного энергоносителя от низкпотенциальных источников обеспечивает установленную температуру рециркуляционного потока на входе в укрытие печи согласно [1] на уровне 5–10 °С.

С целью более эффективного использования теплоты охлаждения печи и энергии низкпотенциальных источников из обратной магистрали системы теплоснабжения вода поступает по трубопроводу через трехходовой регулятор 9 в калорифер 2 для стабилизации в нем гидравлического режима, а также параллельно основной частью поступает в конденсаторный теплообменник 4 для подогрева циркулирующей воды в системе теплоснабжения.

В случае снижения мощности системы теплоснабжения предусмотрена возможность аккумуляции теплоты в баке-аккумуляторе 7 с помощью регулирующего трехходового крана 15.

Технико-экономическая эффективность применения предложенной схемы теплоснабжения заключается в расширении теплоэнергетического потенциала анализируемой системы, которая позволяет улучшить энерго-экономические характеристики систем теплоснабжения. Предложенная система может применяться без традиционного источника теплоты. Предварительно охлажденная исходная вода с постоянной температурой поддерживается на заданном постоянном низкотемпературном уровне на протяжении не только холодного, но и теплого периодов года. Следовательно, стабилизация установленной начальной температуры рециркуляционного воздуха на входе в укрытие печи поддерживается также на постоянном уровне независимо от изменения температуры окружающей среды в процессе автоматического смешивания переохлажденного рециркуляционного потока и газовоздушного теплоносителя от низкпотенциального источника. При этом в процессе прохождения постоянного расхода теплоносителя с необходимой интенсивностью охлаждения в воздушном контуре поддерживается требуемый теплотехнологический режим стабилизирующего охлаждения укрываемой поверхности вращающейся печи.

В процессе воздушоструйного воздействия тепловой поток с поверхности охлаждения вращающейся печи воспринимается рециркулирующей газовоздушной средой, в связи с чем справедлива зависимость

$$Q_{\pi} = F\alpha(\tau_{\pi} - t_{\pi}) = G_{\pi}c(t_{\pi} - t_{\pi}). \quad (1)$$

Уравнение теплового баланса системы отбора теплоты по газовоздушному контуру в процессе охлаждения печи представляется в общем виде:

$$Q = Q_{\pi} + Q_{\text{нп}}, \quad (2)$$

где Q_{π} – тепловой поток, воспринятый с охлаждаемой поверхности вращающейся печи, Вт; $Q_{\text{нп}}$ – тепловой поток, поступающий от низкпотенциального источника, Вт.

Передача теплоты, воспринятой с поверхности печи, происходит в рекуперативных теплообменниках РТ1, РТ2, а также в испарителе И термотрансформаторного контура парокомпрессионного теплового насоса, в связи с чем

$$Q = Q_{\text{РТ1}} + Q_{\text{РТ2}} + Q_{\text{И}}, \quad (3)$$

где Q_{PT1} , Q_{PT2} – воспринятая теплота в утилизационных рекуперативных теплообменниках PT1, PT2, Вт; $Q_{И}$ – утилизируемый тепловой поток в испарителе И термотрансформаторного контура, Вт.

При этом утилизируемый тепловой поток в догревающем рекуперативном теплообменнике PT1 определяется соответствующим расходом воздуха и перепадом температур:

$$Q_{PT1} = G_{п} c_1 (t_{п} - t_{п1}), \quad (4)$$

где $G_{п}$ – расход газовой воздушной среды в циркуляционном контуре охлаждения печи, кг/с; $t_{п}$ – температура газовой воздушного потока после укрытия печи, °С; $t_{п1}$ – температура циркуляционного потока после рекуперативного теплообменника PT1, °С; c_1 – средняя теплоемкость газовой воздушной среды, Дж/(кг · °С).

Аналогично тепловой поток, воспринятый в рекуперативном теплообменнике PT2, определяется по зависимости

$$Q_{PT2} = G_{п} c_2 (t_{п1} - t_{п2}), \quad (5)$$

где $t_{п2}$ – температура воздушного потока после регенеративного теплообменника PT2, °С; c_2 – средняя теплоемкость газовой воздушной среды, Дж/(кг · °С).

Тепловой поток, воспринятый в испарителе И термотрансформаторного контура, может быть представлен в виде:

$$Q_{И} = G_{п} c_{И} (t_{п2} - t_{вх}), \quad (6)$$

где $t_{вх}$ – температура доохлажденного газовой воздушного потока после испарителя И, °С; $c_{И}$ – средняя теплоемкость газовой воздушной среды, Дж/(кг · °С).

Тепловой поток, поступающий от низкопотенциального источника, запишем в виде:

$$Q_{нп} = y G_{п} c_{нп} (t_{нп} - t_{вх}), \quad (7)$$

а энергию доохлаждения исходной холодной воды $t_{хв}$ сбросной частью газовой воздушного потока $Q_{сб}$ в теплый период года в диапазоне температур $(t_{хв} - t_{х1})$, °С, представим аналогично в следующей форме:

$$Q_{сб} = y G_{п} c_{вх} (t_{х1} - \Delta t - t_{вх}), \quad (8)$$

где y – часть газовой воздушного потока, поступающая от низкопотенциального источника в компенсацию равновесной сбросной части общего рециркуляционного потока; $t_{х1}$ – температура воды, поступающей в рекуперативный теплообменник PT3, °С; Δt – температурный перепад недоохлаждения исходной холодной воды относительно температуры сбросной части рециркуляционного потока, определяемый установленной поверхностью теплообменника PT3, °С; $t_{нп}$ – температура газовой воздушной среды, поступающей от низкопотенциального источника, °С; $c_{нп}$, $c_{вх}$ – средняя теплоемкость газовой воздушной среды при соответствующей температуре, Дж/(кг · °С).

Тепловой поток охлаждения печи и низкопотенциального источника в газовой воздушном циркуляционном контуре системы теплоснабжения на основе зависимости (2) с учетом (4)–(8) записывается в обобщенном виде:

$$Q_{гв} = Q_{п} + Q_{нп} = G_{п} c_1 (t_{п} - t_{п1}) + G_{п} c_2 (t_{п1} - t_{п2}) + G_{п} c_{И} (t_{п2} - t_{вх}) - y G_{п} c_{вх} (t_{х1} - \Delta t - t_{вх}) + y G_{п} c_{нп} (t_{нп} - t_{вх}). \quad (9)$$

Температура доохлаждаемого газозвдушного потока после испарителя И термотрансформаторного контура определяется из зависимости (6) в следующем виде:

$$t_{\text{вх}} = t_{\text{п2}} - \frac{Q_{\text{И}}}{c_{\text{И}} G_{\text{п}}}. \quad (10)$$

Принимая во внимание, что воспринятый тепловой поток в конденсаторе $Q_{\text{к}}$ определяется тепловой мощностью испарителя $Q_{\text{И}}$ и приводной мощностью компрессора N ,

$$Q_{\text{к}} = Q_{\text{И}} + N, \quad (11)$$

а коэффициент преобразования представляет отношение

$$\phi = \frac{Q_{\text{к}}}{N}, \quad (12)$$

откуда $N = \frac{Q_{\text{к}}}{\phi}.$

В результате воспринятый тепловой поток в испарителе согласно (11) представляется в следующем виде:

$$Q_{\text{И}} = Q_{\text{к}} - \frac{Q_{\text{к}}}{\phi} = Q_{\text{к}} \left(1 - \frac{1}{\phi} \right). \quad (13)$$

С учетом зависимостей (10), (13) и соотношения (9) и принимая во внимание, что $c_{1-2} \approx c_{\text{нп-вх}}$, зависимость определения отбираемого общего теплового потока в рециркуляционном газозвдушном контуре анализируемой системы теплоснабжения (2) упрощается до вида:

$$Q = Q_{\text{п}} + Q_{\text{нп}} = G_{\text{п}} c [(t_{\text{п}} - t_{\text{п2}}) + \gamma(t_{\text{нп}} - t_{\text{х1}} + \Delta t)] + Q_{\text{к}} \left(1 - \frac{1}{\phi} \right). \quad (14)$$

Тепловой поток, воспринятый нагреваемой водой в конденсаторе теплонасосной установки, определяется мощностью тепловых потоков нагрева проточной воды и ее рециркуляционной части из системы горячего водоснабжения, а с учетом того, что $G_{\text{гв}} = \beta G_{\text{хв}}$ и $G_{\text{рец}} = \mu G_{\text{гв}}$, приобретает следующий вид:

$$Q_{\text{к}} = G_{\text{хв}} c_{\text{в}} [(t_{\text{гв1}} - t_{\text{гв2}}) + \mu \beta (t_{\text{гв1}} - t_{\text{рец}})], \quad (15)$$

где $G_{\text{хв}}$ – расход исходной холодной воды, нагреваемой в конденсаторе, кг/с; $G_{\text{рец}}$ – расход рециркуляционной части абонентского теплоносителя, кг/с; $t_{\text{гв1}}$ – температура воды после конденсатора теплонасосного контура, °С; $t_{\text{гв2}}$ – температура воды после регенеративного теплообменника РТ2, °С; $t_{\text{рец}}$ – температура рециркуляционного потока из системы горячего водоснабжения, °С; μ – коэффициент рециркуляции воды в системе горячего водоснабжения; $c_{\text{в}}$ – средняя теплоемкость воды, Дж/(кг · °С).

Энергетическую эффективность преобразования сопряженных энергетических потоков в анализируемой системе теплоснабжения представим в виде зависимости коэффициента преобразования относительно определяющих исходных и режимных параметров.

Общий тепловой поток, отбираемый с поверхности печи и воспринятый от низкотемпературного источника согласно зависимости (2) с учетом (1) и (7), представим в виде:

$$Q = G_{\text{п}} c (t_{\text{п}} - t_{\text{н}}) + y G_{\text{п}} c (t_{\text{нп}} - t_{\text{вх}}). \quad (16)$$

Из равенства зависимостей (16) и (14) с учетом (15) после соответствующих преобразований зависимость действительного коэффициента преобразования приобретает окончательный вид:

$$\varphi = \frac{1}{1 - \frac{G_{\text{п}} c (t_{\text{п2}} - t_{\text{н}} - y t_{\text{вх}} + y t_{\text{х1}} - y \Delta t)}{G_{\text{хв}} c_{\text{в}} [(t_{\text{гв1}} - t_{\text{гв2}}) + \mu \beta (t_{\text{гв1}} - t_{\text{рец}})]}}. \quad (17)$$

Графическая интерпретация зависимости (17) представлена на рис. 2 при следующих исходных данных и режимных условиях работы системы:

$$\frac{c}{c_{\text{в}}} = 0,25; t_{\text{н}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_{\text{п2}} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}; y = 0,2; t_{\text{вх}} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_{\text{х1}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}; \Delta t = 3 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_{\text{гв1}} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_{\text{гв2}} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}; \beta = 1,0 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_{\text{рец}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

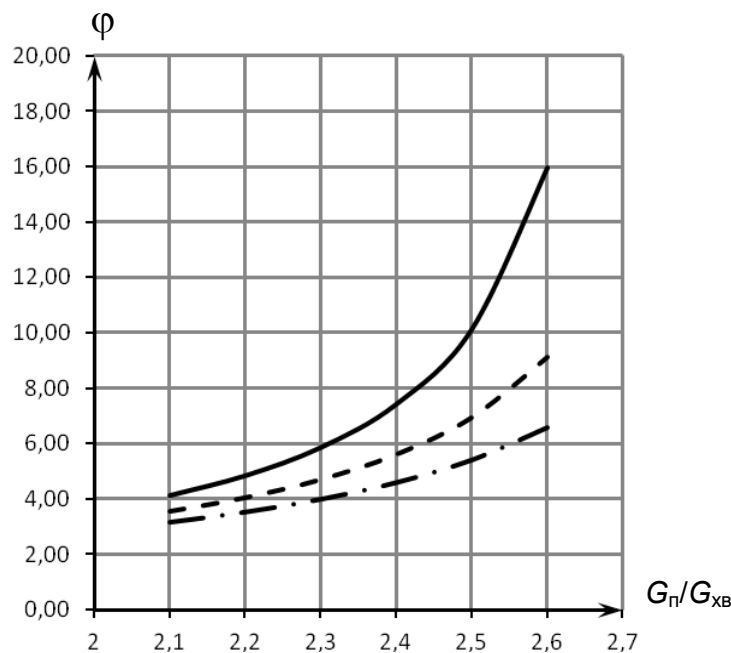


Рис 2. Зависимость коэффициента преобразования от соотношения расходов греющего теплоносителя и нагреваемой среды:

— при $\mu = 0,2$; — — — при $\mu = 0,25$; — · — при $\mu = 0,3$

Заключение

1. Разработана новая рекуперативно-трансформаторная система с переохлаждением рециркуляционного потока охлаждения печи, которая повышает теплотехнологическую и энергетическую эффективность печных агрегатов, расширяя технико-экономическую эффективность промышленного теплоснабжения в совместном процессе интеграции теплоты охлаждения вращающейся печи и низкотемпературных источников.

2. В результате аналитического исследования предложенной системы установлено новая обобщенная зависимость оценки эффективности преобразования интегрированных потоков, позволяющая анализировать и производить оценку индивидуального влияния исходных и режимных параметров и их рационального сочетания для достижения высокоэффективной работы предложенной системы теплоснабжения.

3. Установлено, что увеличение расхода газозвоздушного потока при заданной мощности отбора теплоты с охлаждаемой поверхности печи приводит к возрастанию коэффициента преобразования в зависимости от реальных значений изменения рециркуляционной части теплоносителя в системе горячего водоснабжения.

4. Результаты исследования рациональной взаимосвязи исходных и режимных параметров создают основу для инженерной разработки предложенных систем теплоснабжения на основе стабилизирующего охлаждения вращающейся печи.

Литература

1. Петраш, В. Д. Теплоснабжение на основе утилизации энергии регулируемого охлаждения вращающихся печей / В. Д. Петраш. – Одесса : ВМВ, 2006. – 288 с.
2. Петраш, В. Д. Патент на винахід № 88327. Система стабілізуючого охолодження печі на основі термотрансформації теплоти, яка утилізується / В. Д. Петраш, І. В. Сорокіна, Д. В. Басіст // Бюл. № 19, 2009 р. ДП «Український ін-т промислової власності», К.
3. Петраш, В. Д. Повышение энерготехнологической эффективности вращающейся печи и качества теплоснабжения на основе термотрансформаторного цикла утилизации теплоты / В. Д. Петраш, И. В. Сорокина, Д. В. Басист // Энерготехнология и ресурсосбережение : науч.-техн. журн. Ин-та газа НАН Украины. – К., 2008. – № 4. – С. 22–25.
4. Петраш, В. Д. Патент на корисну модель № 61472. Система теплопостачання на основі термотрансформації енергії стабілізуючого охолодження печі та низькопотенціальних джерел / В. Д. Петраш, І. В. Чернишова // Бюл. № 14, 2011 р. – ДП «Український ін-т промислової власності», К.
5. Петраш, В. Д. Теплоснабжение на основе интеграции термотрансформированной энергии охлаждения печи и низкопотенциальных источников / В. Д. Петраш, И. В. Чернышева // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. КНУБА. – Київ : КНУБА. – 2012. – Вип. № 16. – С. 84–92.
6. Дорофеев, В. С. Патент на винахід № 101512. Система теплопостачання на основі термотрансформованої енергії охолодження печі та переохолодження теплоносія низькопотенціальних джерел / В. С. Дорофеев [та інш.] // Бюл. № 7. – 2013 р. – ДП «Український ін-т промислової власності», К.

Получено 14.10.2013 г.

УДК 621.311

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

Н. В. ГРУНТОВИЧ, Е. Л. ШЕНЕЦ, С. А. ЖЕРАНОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Предприятия по производству листового стекла являются потребителями ТЭР со сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией. Это означает, что на конечное потребление того или иного энергоресурса, затрачиваемого на производство стекла, влияет значительное количество технологических факторов. Поэтому для таких потребителей сложной и актуальной остается проблема оценки эффективности внедряемых мероприятий по энергосбережению. Сложность задачи обуславливается тем, что технологические линии производства листового стекла работают в условиях изменяющейся производственной программы, что оказывает значительное влияние на результирующую энергоэффективность (ЭЭФ) режимов работы. В настоящее время стекольные предприятия Республики Беларусь активно занимаются реконструкцией своих производств. Для оценки ЭЭФ технологического процесса производства листового стекла в условиях проводимой модернизации и реконструкции могут быть использованы два подхода:

- оценка ЭЭФ с использованием однофакторных моделей энергопотребления на выпуск продукции;
- оценка ЭЭФ на основе анализа структурных моделей удельных расходов ТЭР на производство продукции (листового стекла).

Основная часть

Рассмотрим подходы к оценке ЭЭФ и ее динамики для технологических линий производства листового стекла с использованием структурных моделей удельных расходов ТЭР на выпуск продукции.

В качестве математического аппарата для анализа энергоэффективности производства листового стекла используется кластерный анализ [1], [2].

Кластерный анализ, а именно *структурный анализ данных*, имеет ряд преимуществ:

- позволяет наглядно представить информацию обрабатываемых статистических данных в виде структурных моделей удельных расходов ТЭР на производство листового стекла;
- по показателям модели выявить базисный режим работы технологической линии и дополнительные рабочие режимы, которые позволяют оценить ЭЭФ производства и предложить мероприятия, направленные на ее повышение.

Структурную группировку технологических состояний объекта (одномерное пространство признаков) можно выполнить в следующей последовательности [1], [3]:

1. Количественные характеристики признака на начальном этапе рассматриваются как отдельные классы. Происходит сравнение значений признака по всем классам.

2. Два ближайших класса объединяются, и рассчитывается расстояние от этого класса до остальных по выражению

$$R_{k_j k_i} = \sqrt{(M_{k_j} - M_{k_i})^2}, \quad (1)$$

где M_{k_j} , M_{k_i} – средние значения классифицируемого признака по классам k_j и k_i соответственно.

После чего определяется значение внутриклассового коэффициента вариации по каждому классу:

$$V = \left(\frac{\sigma_{k_i(j)}}{M_{k_i(j)}} \right) 100 \%, \quad (2)$$

где $\sigma_{k_i(j)}$ – среднее квадратическое отклонение значения признака по классам k_j и k_i .

Каждый сформированный класс характеризуется объемом и средней величиной характеристики признака, а также значением коэффициента вариации, характеризующим качество разбиения.

3. Классы с наименьшим расстоянием объединяются вновь (рис. 1).

Процесс повторяется до тех пор, пока максимальный коэффициент вариации не превысит заданного значения. Если по оси ординат откладывать средние значения характеристики признака, а по оси абсцисс количество признаков, вошедших в каждый класс, то в результате получим структурную модель (рис. 2) классифицируемого признака. Ранее были получены структурные модели суточного электропотребления [3], [4] промышленных предприятий и выявлены закономерности их формирования.

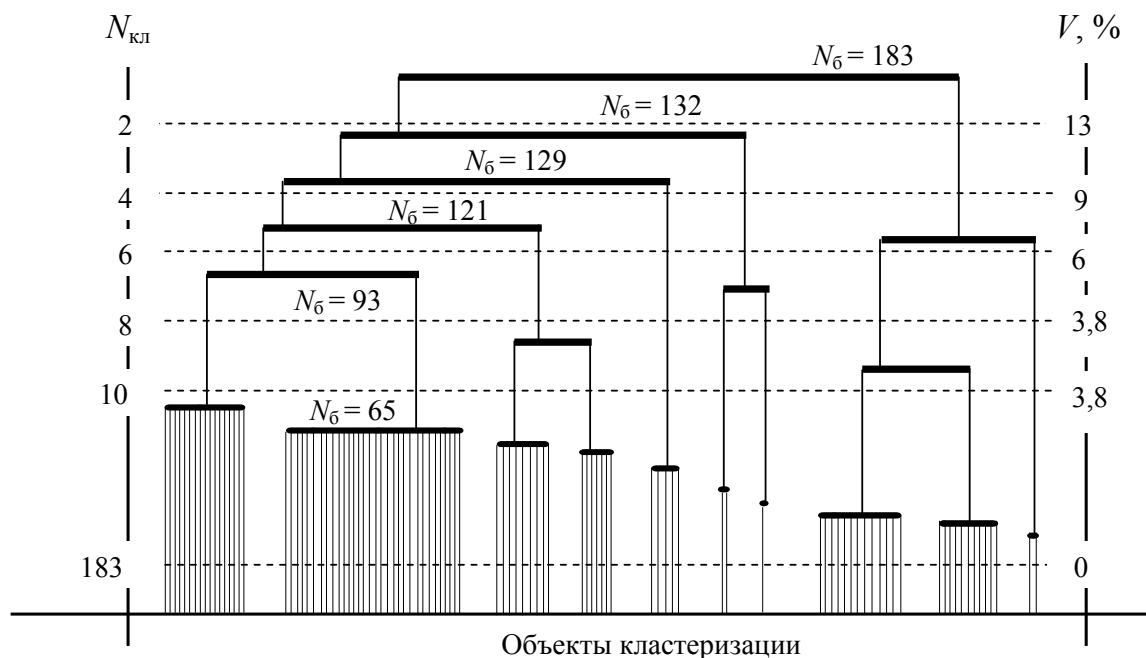


Рис. 1. Дендограмма кластеризации методом средней связи:
 $N_{кл}$ – количество классов на каждом шаге кластеризации;
 V – коэффициент вариации базисного класса емкостью N_6

Ранее проведенные исследования структуры суточного электропотребления ($W_{сут}$) промышленными предприятиями (ПП) на годовом интервале позволили не только выявить закономерности формирования структуры суточного электропотреб-

ления каждого ПП, но и доказать устойчивость структуры во времени [3], [4]. В структурной модели выделялся *базисный класс* (самый емкий по количеству дней, вошедших в него). У ПП базисный класс по временной емкости составлял от 70 до 95 % исследуемой выборки.

Для ПП было установлено три вида структурных моделей $W_{\text{сут}}$: с верхним расположением базисной ступени (рис. 2); со средним расположением базисной ступени; с нижним расположением базисной ступени. Знание закономерностей структуры $W_{\text{сут}}$ позволяло решать задачи прогнозирования параметров электропотребления, оценивать возможность безущербного регулирования электропотребления ПП. С использованием параметров структурной модели $W_{\text{сут}}$ давалась оценка стабильности режимов работы ПП. О стабильности режимов электропотребления и отлаженности технологического процесса свидетельствует большая временная емкость базисного класса (60–95 % рабочих дней предприятия) и незначительная величина отклонения среднесуточного электропотребления дополнительных классов относительно базисной ступени (5–10 %).

Для 90-х гг. был характерен общий спад производства и нестабильность режимов работы ПП, что заметно сказалось на их структуре электропотребления: у большинства ПП структурная модель суточного электропотребления трансформировалась в *модель с дроблением ступеней*, в которой невозможно выделить базисный класс. ПП, имеющие модель электропотребления с дроблением ступеней, первыми ощутили на себе сложности прогнозирования и нормирования расхода ЭЭ, так как их режимы работы отличает многовариантность, учесть которую не представляется возможным с использованием аналитических подходов и месячной, квартальной статистики по потреблению электрической энергии и технологическим показателям [4].

Аналогичные исследования, но применительно к удельным расходам ТЭР на единицу продукции, были произведены для технологических линий производства листового стекла. Для исследований была сформирована информационная база суточных данных по параметрам технологического процесса производства листового стекла.

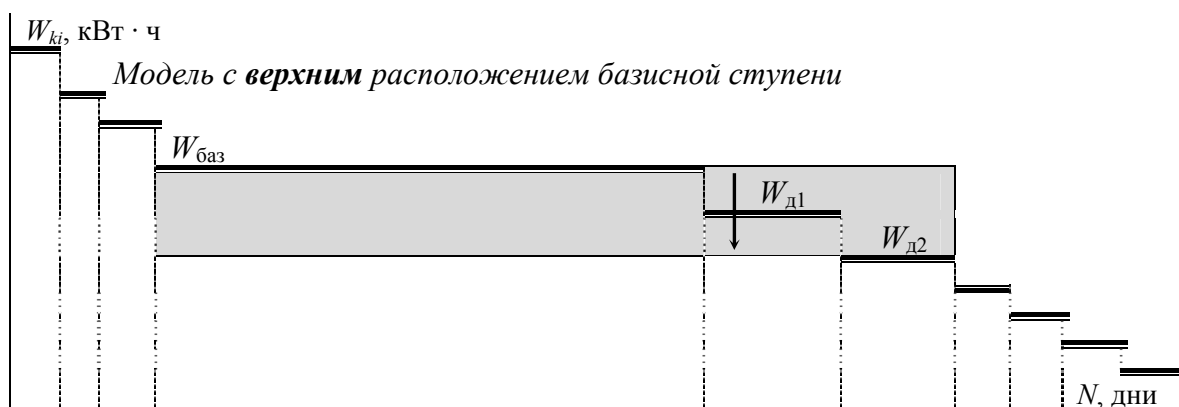


Рис. 2. Один из характерных видов структурной модели суточного электропотребления промышленными предприятиями

Основным энергоносителем технологического процесса производства листового стекла является природный газ. Современные стекловаренные печи высокой производительности могут быть оборудованы дополнительным электроподогревом (ДЭП), в качестве второго энергетического ресурса выступает электроэнергия.

Для комплексной оценки ЭЭФ, введенной в эксплуатацию технологической линии Л2, воспользуемся общими затратами ТЭР, приведенными к условному топливу, т у. т.

Перевод расхода природного газа, м^3 , и потребленной электроэнергии, $\text{кВт} \cdot \text{ч}$, в т у. т. производится с учетом действительных коэффициентов по формуле

$$\text{ОЭЗ} = W_{\text{эзсут}} \cdot 0,28/1000 + W_{\text{газсут}}/1000(Q_{\text{н}}^{\text{р}}/7000), \text{ т у. т.}, \quad (3)$$

где 0,28 – калорийный коэффициент пересчета электрической энергии, выраженной в тыс. $\text{кВт} \cdot \text{ч}$ в условное; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – фактическое значение теплоты сгорания газа, $\text{ккал}/\text{м}^3$.

Кластеризация суточных удельных значений расхода ТЭР произведена с помощью программы «KLAST».

Результаты кластеризации суточных удельных расходов ТЭР на производство листового стекла за 2009–2010 гг. представлены в табл. 1. Разбиение всей совокупности удельных расходов ТЭР ограничено десятью классами. При этом следует отметить высокое качество классификации, поскольку коэффициент вариации, характеризующий качество разбиения, находится в диапазоне от 0 до 4,65 %.

Базисный режим работы в 2009 г. включает 226 дней (61,9 % от общего количества) со среднесуточным удельным значением ТЭР – 265,5 кг у. т./т, или 0,265 т у. т./т. Наряду с базисным режимом можно выделить два класса – 6 и 8 со значениями удельных расходов ТЭР: 283,7 кг у. т./т и 254,1, кг у. т./т, временная емкость которых, составляет, соответственно, 24 и 107 суток.

В табл. 1 представлены результаты кластеризации суточных удельных значений ТЭР за 2010 г. и структурная модель.

Как видно из данных приложения, в 2010 г. базисным режимом является класс № 8 со среднесуточными удельными затратами ТЭР 205,4 кг у. т./т и временной емкостью 155 суток, охватывающим 42 % годового времени. Этот класс характеризует режимы ввода в эксплуатацию технологической линии Л2. Сопоставив базисные значения удельных расходов ТЭР 2010 и 2009 гг., можно определить эффективность производства листового стекла от ввода в эксплуатацию линии Л2:

$$\Delta\text{ЭЭФ} = (205,4 - 265,5)/265,5 \cdot 100 \% = -22 \% \text{ (экономия)}.$$

Помимо базисного режима, определенным вводом линии Л2, существует еще два режима – это классы № 5 и 7 со средними удельными расходами ТЭР 263,8 кг у. т./т (временная емкость – 82 дня) – работа линии Л1, и удельные расходы ТЭР 232,7 кг у. т./т (временная емкость класса 81 день – совместный режим старой линии Л1 и Л2).

В табл. 2 представлены результаты кластеризации суточных удельных значений ТЭР за 2011–2012 гг.

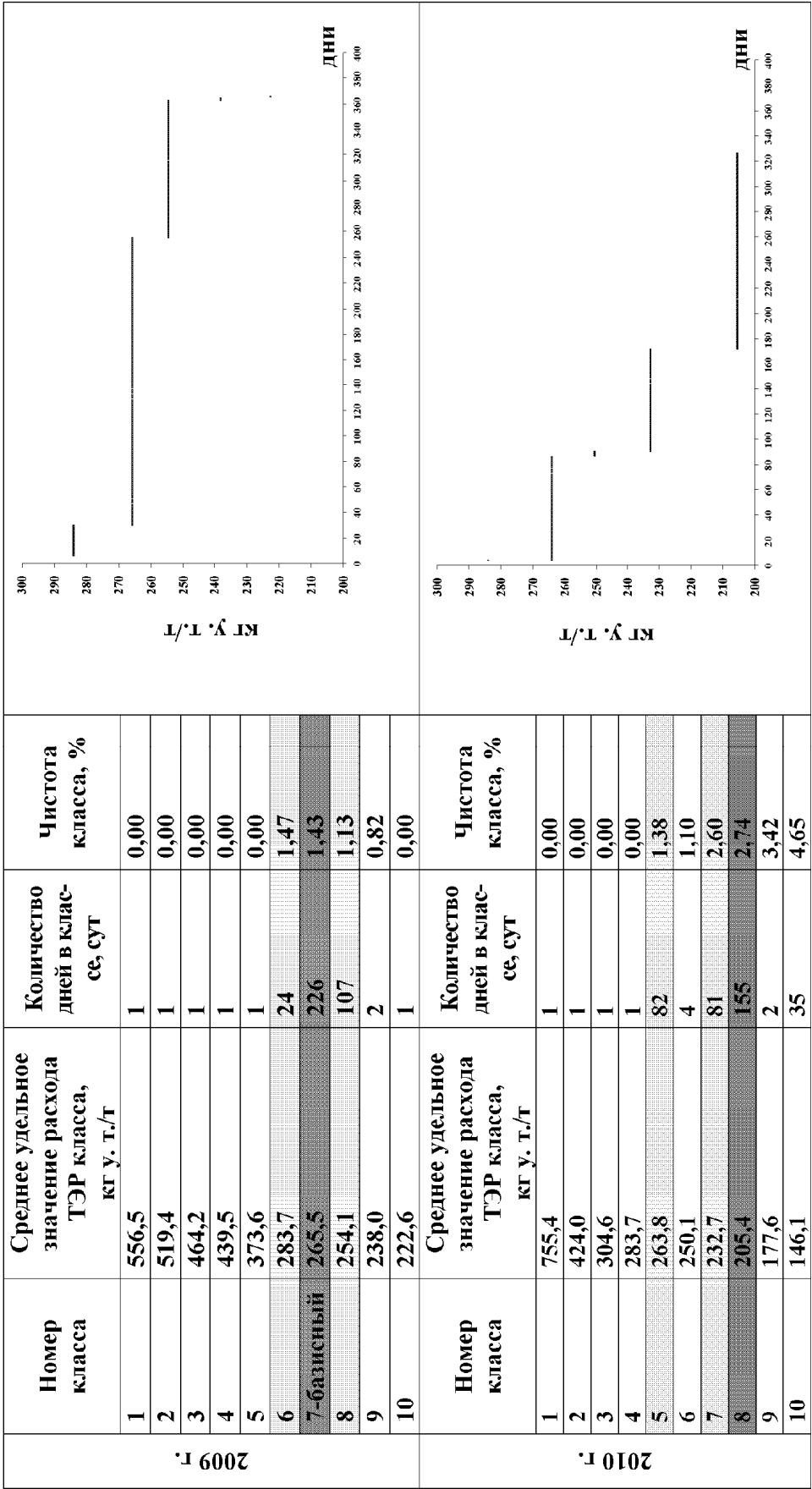
Как видно из табл., в 2011 г. равнозначными по емкости являются два класса – класс № 3 и класс № 4, а также два дополнительных класса – № 2 и № 5. Это объясняется отладкой режимов новой технологической линии Л2.

В 2012 г. была продолжена отладка технологической линии Л2, причем с дальнейшим снижением удельных значений расхода ТЭР относительно базисного режима 2011 г. Рост энергоэффективности производства составил (относительно базисных классов 2012 и 2011 гг.):

$$\Delta\text{ЭЭФ} = (202,3 - 221,6)/221,6 \cdot 100 \% = -8 \% \text{ (экономия)}.$$

Таблица 1

Результаты кластеризации (структурного анализа) суточных удельных расходов ТЭР на производство листового стекла



Если сравнить ЭЭФ между базисным классом и дополнительным классом № 9, то рост ЭЭФ производства составил:

$$\Delta \text{ЭЭФ} = (196,3 - 221,6) / 221,6 \cdot 100 \% = -11 \% \text{ (экономия)}.$$

Временная емкость базисного режима в 2012 г. составила 119 суток, или 32 % от годового количества дней, а второго базисного режима – 109 суток, или 29 % от общего количества дней. Фактически 62 % годового времени производство отработало с энергоэффективностью – –8 % и 26 % времени с энергоэффективностью – –11 % относительно режимов 2011 г.

Таким образом, кластерный анализ (структурная группировка) удельных расходов ТЭР на производство листового стекла позволил оценить рост энергоэффективности производства с 2009 по 2012 г. с вводом в эксплуатацию новой технологической линии Л2.

С использованием структурной модели удельных расходов ТЭР может быть произведена оценка потенциала роста ЭЭФ за счет увеличения загрузки технологических линий.

Наиболее эффективной с точки зрения удельных расходов ТЭР является модель с нижним расположением базисной ступени. Среднее удельное значение расхода ТЭР данного типа модели является минимальным, а значит более эффективным по отношению к другим режимам. Анализ структурных моделей удельных расходов ТЭР за 2009–2012 гг. позволил установить, что в 2009 г. структурная модель удельных расходов ТЭР относилась к виду со средним расположением базисной ступени. В 2010–2011 гг. структурные модели имели вид с дроблением ступеней, а в 2012 г. структурная модель удельных расходов ТЭР приняла вид со средним расположением базисной ступени.

В 2009 г. в условиях увеличения загрузки технологической линии Л1 вид модели трансформировался в модель с нижним расположением базисной ступени и рост ЭЭФ производства листового стекла мог составить:

$$\Delta \text{ЭЭФ} = (254,1 - 265,5) / 265,5 \cdot 100 \% = -4,29 \text{ (экономия)}.$$

Базисный класс включал бы в себя 333 дня, что объединяло около 91 % от всех рабочих дней периода.

В 2010 г. из-за пуско-наладочных работ, связанных с запуском линии Л2, структурная модель имеет вид *с дроблением ступеней*.

Своевременное увеличение загрузки линии Л2, введенной в эксплуатацию в 2010 г., позволило бы обеспечить рост энергоэффективности:

$$\Delta \text{ЭЭФ} = (221,6 - 225,9) / 225,9 \cdot 100 \% = -1,9 \% \text{ (экономия)}.$$

Базисная ступень при этом объединяла 206 дней, или 56 % от общего расчетного периода. В этих условиях модель трансформировалась в модель с нижним расположением базисной ступени.

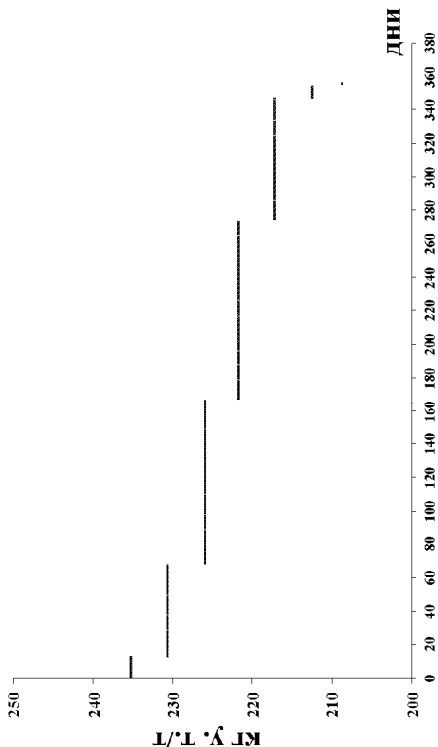
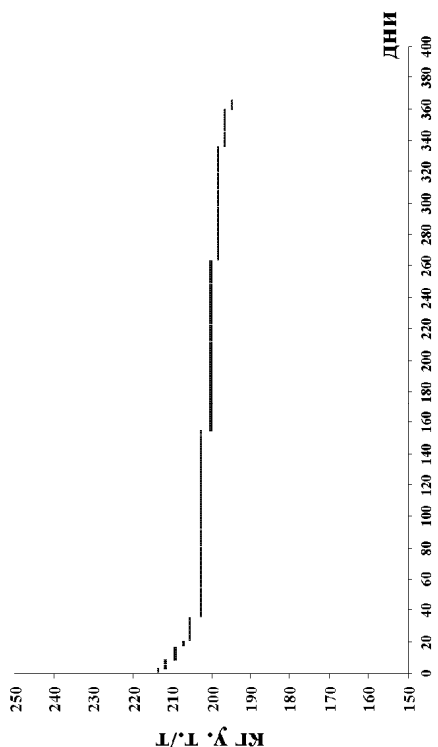
Увеличение загрузки технологической линии Л2 в 2012 г. обеспечило бы переход на более эффективную базисную ступень. Рост ЭЭФ производства в этих условиях составил:

$$\Delta \text{ЭЭФ} = (199,9 - 202,3) / 202,3 \cdot 100 \% = -1,2 \% \text{ (экономия)}.$$

Базисная ступень при этом объединяла 228 дней, или 62,5 % от всего периода работы линии Л2.

Таблица 2

Результаты кластеризации (структурного анализа) суточных удельных расходов ТЭР на производство листового стекла

					2011 г.	
Номер класса	Среднее удельное значение расхода ТЭР класса, кг у. т./т	Количество дней в клас- се, сут	Чистота класса, %			
1	235,1	12	0,40			
2	230,6	55	0,53			
3	225,9	99	0,62			
4	221,6	107	0,49			
5	217,0	73	0,75			
6	212,4	8	0,40			
7	208,6	1	0,00			
8	197,6	2	0,50			
9	169,8	1	0,00			
10	160,6	1	0,00			
					2012 г.	
Номер класса	Среднее удельное значение расхода ТЭР класса, кг у. т./т	Количество дней в клас- се, сут	Чистота класса, %			
1	213,3	2	0,06			
2	211,5	6	0,28			
3	209,1	8	0,35			
4	206,8	4	0,19			
5	205,1	15	0,25			
6	202,3	119	0,42			
7	199,9	109	0,33			
8	197,9	72	0,25			
9	196,3	24	0,20			
10	194,6	6	0,11			

Из представленных расчетов видно, что наибольшую энергоэффективность можно было достичь в 2009 г. С увеличением времени эксплуатации технологической линии в структурной модели удельных расходов ТЭР между базисной и дополнительными ступенями появляется больший разброс, что обусловлено как нестабильностью режимов потребления ТЭР, так и снижением их эффективности вследствие старения футеровки печи и другого оборудования технологической линии.

Ввод в эксплуатацию в 2010 г. технологической линии Л2 позволил увеличить ЭЭФ производства листового стекла на 22 %.

Заключение

Оценка ЭЭФ ввода в эксплуатацию новой технологической линии Л2 производилась по удельным значениям суммарных энергозатрат на производство листового стекла (газ и электроэнергия, приведенные к условному топливу, т у.т.).

Для оценки ЭЭФ ввода в эксплуатацию современной технологической линии Л2 производства листового стекла может быть использован аппарат кластерного анализа, а именно структурный анализ суточных удельных расходов ТЭР на выпуск продукции.

Полученные в результате кластеризации структурные модели суточных удельных расходов ТЭР на производство листового стекла позволяют:

- выделять базисные режимы работы технологической линии;
- оценивать потенциал повышения ЭЭФ;
- выполнить анализ нестандартных (как по количеству дней, так и удельному расходу ТЭР) режимов работы производства;
- оценить эффект от внедренных технологических мероприятий. Эффективность производства стекла от ввода в эксплуатацию технологической линии Л2 составляет 22 %.

Структурные модели удельных расходов ТЭР производства листового стекла имеют вид: 2009 г. – модель со средним расположением базисной ступени; 2010–2011 гг. – модель с дроблением ступеней (из-за отладки режимов); 2012 г. – модель со средним расположением базисной ступени.

Своевременный анализ режимов работы технологической линии за предшествующий период дает прогнозную оценку режима работы текущего года и принять меры для роста ЭЭФ.

Литература

1. Мандель, И. Д. Кластерный анализ / И. Д. Мандель. – М. : Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
2. Ким, Дж.-О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.-О. Ким [и др.]. – М. : Финансы и статистика, 1989.
3. Токочакова, Н. В. Определение договорных значений мощности и прогнозная оценка электропотребления рабочих суток промышленных потребителей региона : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Н. В. Токочакова ; МЭИ. – М., 1990 – 19 с.
4. Токочакова, Н. В. Структурное моделирование суточного электропотребления промышленных предприятий энергосистемы для быстрой оценки электросбережения / Н. В. Токочакова, В. И. Токочаков, Т. В. Алферова // Энергоэффективность. – 2001. – № 2. – С. 18–21.

Получено 10.10.2013 г.

УДК 621.311

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КАБЕЛЯ

А. А. КАПАНСКИЙ, Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Как правило, основу городских электрических сетей среднего напряжения, питающих жилые и промышленные здания, составляют кабельные линии, протяженность которых с каждым годом непрерывно увеличивается. Силовые кабели, предназначенные для передачи и распределения электрической энергии, занимают первое место в структуре выпуска всех типов кабельных изделий [1].

В процессе эксплуатации происходит нагрев силового кабеля из-за потерь активной мощности в его жиле и других элементах. Предельно допустимые токовые нагрузки зависят от допустимой температуры нагрева кабеля или провода в процессе эксплуатации, при которой изоляция не будет подвергаться ускоренному старению или снижению механической прочности и эластичности [2]. Под допустимой температурой нагрева кабеля понимают температуру токопроводящей жилы, при которой нагрев изоляции не будет превышать значений, установленных ПУЭ. Тепловой расчет кабеля сводится к определению температуры токоведущей жилы с учетом потерь тепловой энергии во всех его элементах (основная изоляция, защитная оболочка, броня, окружающая среда) [3].

В процессе проведения теплотехнических расчетов по определению температуры кабеля, находящегося под нагрузкой, необходимо уделить особое внимание расчету тепловых сопротивлений. Величина теплового сопротивления изоляции зависит как от геометрических размеров кабеля, так и его конструкции. Для математического описания конструкции кабеля в расчетах теплового сопротивления вводится параметр «геометрический фактор», который для большинства типов кабелей необходимо определять весьма трудоемким способом. Расчет теплового сопротивления окружающей среды является достаточно сложной задачей, поскольку для корректного описания математической модели необходимо учитывать множество факторов (число кабелей, место и способ прокладки, характер нагрузки и др.). Для нахождения значений тепловых сопротивлений кабеля зачастую приходится вычислять искомые величины итерационным путем, что доставляет значительные неудобства в скорости и качестве расчета.

Рассмотренные выше требования показывают сложность проведения вычислений теплового сопротивления кабеля в целом. Инженерные расчеты без использования ЭВМ могут приводить к погрешностям при определении теплового сопротивления кабеля, что в свою очередь приводит к погрешности в определении допустимой токовой нагрузки. В связи с этим ставится задача разработки программного обеспечения, позволяющего без значительных затрат труда производить расчет теплового сопротивления элементов кабеля и окружающей среды.

Компьютерная программа «Thermal Resistance»

В рамках решения поставленной задачи в соответствии с методикой расчета, приведенной в ГОСТ Р МЭК 60287-2-1–2009, на кафедре «Электроснабжение» ГГТУ

им. П. О. Сухого авторами была разработана компьютерная программа «Thermal resistance» (тепловое сопротивление), позволяющая производить расчет внутреннего и внешнего тепловых сопротивлений кабелей, проложенных на воздухе, в каналах и земле. Внешний вид главного окна разработанной программы представлен на рис. 1.

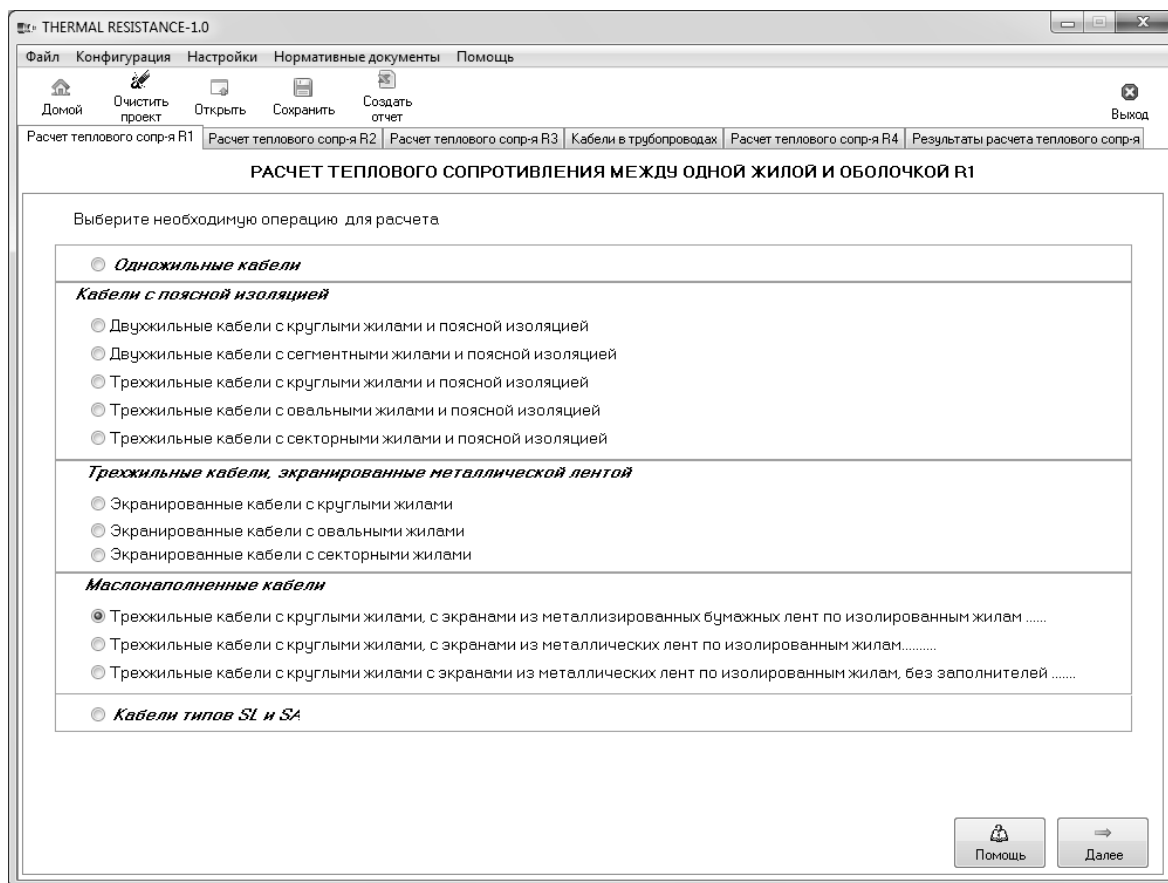


Рис. 1. Внешний вид главного окна компьютерной программы «Thermal resistance»

Компьютерная программа «Thermal Resistance» предназначена для решения следующих задач:

- расчета теплового и термического сопротивления на фазу между жилой и оболочкой;
- расчета теплового и термического сопротивления между оболочкой и броней;
- расчета теплового и термического сопротивления наружного защитного покрытия;
- расчета теплового и термического сопротивления окружающей среды;
- расчета теплового и термического сопротивления между кабелем и каналом (трубой);
- расчета теплового и термического сопротивления канала (трубы);
- расчета внешнего теплового и термического сопротивления среды, окружающей канал (трубу).

Расчетная часть программы написана на языке Delphi диалекта Object Pascal. В большинстве случаев расчет теплового сопротивления основной изоляции, защитной оболочки, брони и окружающей среды в программе производится после того, как выполнилось событие нажатия кнопки «Выполнить». После выполнения данного события программа выводит сообщение о результатах расчета и предлагает пользовате-

лю перейти к выполнению расчета теплового сопротивления оставшихся элементов, составляющих кабель. Если все вычисления произведены, осуществляется переход на вкладку «Результаты расчета теплового сопротивления», где сведены результаты всех предшествующих расчетов и значение результирующего теплового сопротивления, составляющее сумму тепловых сопротивлений отдельных элементов кабеля.

Значения вводимых исходных данных кабеля автоматически определяются программой как глобальные, что позволяет опустить процедуру повторного ввода тех или иных параметров в дальнейших расчетах.

В разработанной программе предусмотрена база данных удельных тепловых сопротивлений материалов кабеля, созданная при помощи средств пакета MS Access. Она включает в себя более двадцати единиц различных изоляционных материалов и защитных покрытий, а также предусматривает возможность добавления и удаления собственных данных. На рис. 2 представлено меню этой базы данных.

Тип материала	Удельное тепловое сопротивление, К м/Вт
Изоляционные материалы:	
Бумажная изоляция в кабелях с пропитанной изоляцией	6
Бумажная изоляция в маслонаполненных кабелях	5
Бумажная изоляция в кабелях с внешним давлением газа	5,5
Бумажная изоляция в кабелях с внутренним давлением газа: с предварительной пропиткой	5,5
Бумажная изоляция в кабелях с внутренним давлением газа: с вязкой пропиткой	1
Полиэтилен (PE)	3,5
Сшитый полиэтилен (XLPE)	3,5
II Полипропилен (PPL)	5,5
Поливинилхлоридный пластикат (PVC): для кабелей на напряжение до 3 кВ включительно	5
Поливинилхлоридный пластикат (PVC): для кабелей на напряжение свыше 3 кВ	5
Бутылкачук	5
Резина	5
Защитные покрытия:	
Компактированный джут и волокнистые материалы	6
Резиновое покрытие, наложенное послойно	6
Полихлоропропен	5,5
ПВХ: для кабелей на напряжение до 35 кВ включительно	5
ПВХ: для кабелей на напряжение свыше 35 кВ	6
Покрытие из поливинилхлоридного пластиката и битума по гофрированной алюминиевой оболочке	6
Полиэтилен (PE)	3,5
Материалы, используемые в конструкции каналов	0
Бетон	1
Волокна	4,8

Рис. 2. Внешний вид меню базы данных удельного теплового сопротивления материалов кабеля

На рис. 3 показана схема меню программы. Оно имеет древовидную структуру, реализованную таким образом, что пользователь затрачивает минимум времени при вводе исходных данных.

Для удобства работы предусмотрена возможность сохранения значений, вносимых в поля ввода программы при ее открытии. Такая функция позволяет ускорить процесс набора исходных данных при незначительных изменениях параметров кабеля.

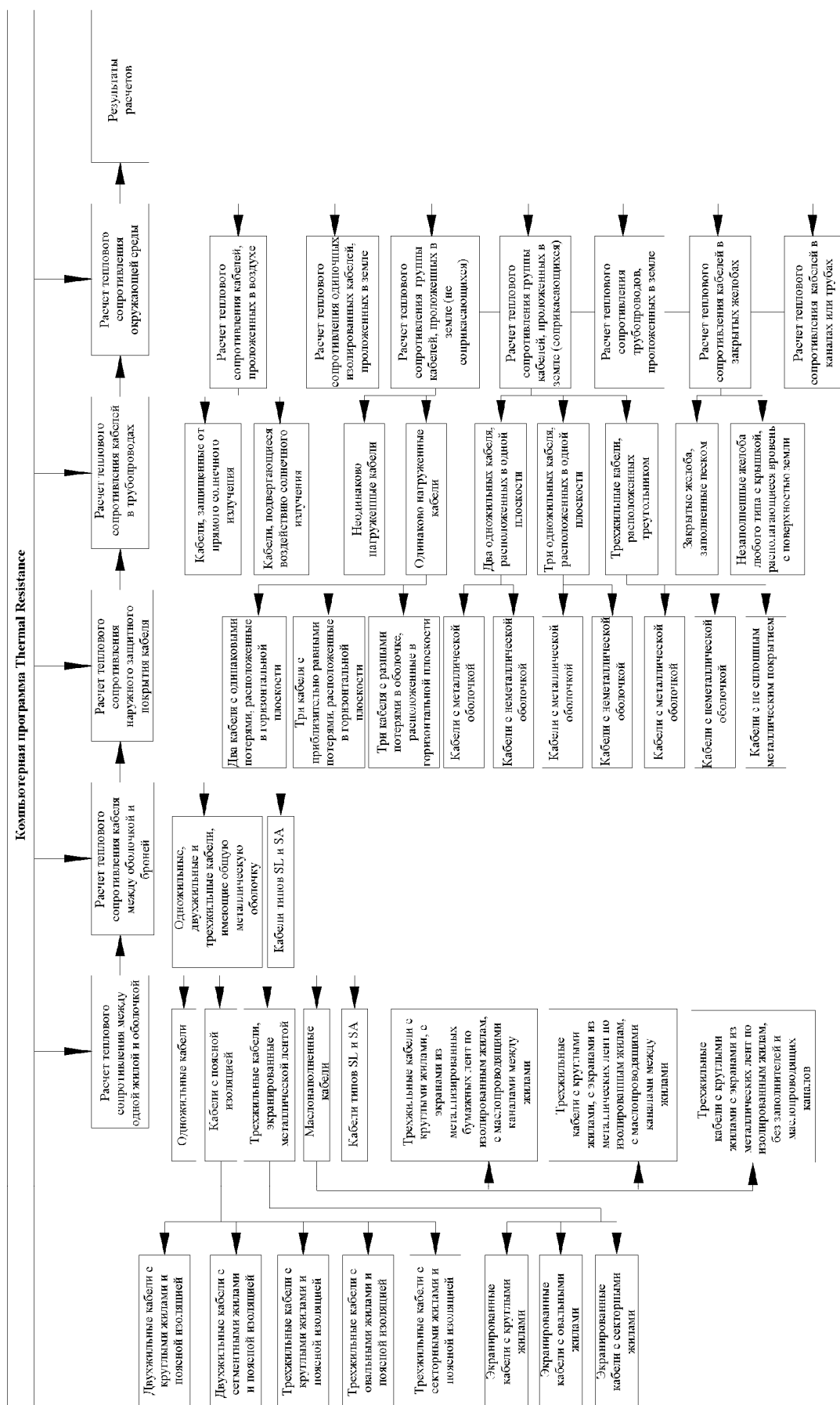


Рис. 3. Структурная схема программы «Thermal Resistance»

В разработанной программе можно как сохранять, так и открывать ранее введенные параметры кабеля. Настройки программы позволяют оперировать цветовой схемой интерфейса и точностью выводимых результатов. В разделе «Нормативные документы» сведены основные стандарты, необходимые для выполнения расчетов по определению номинальных токовых нагрузок кабелей и тепловых сопротивлений.

При выполнении команды «Создать отчет» происходит вывод данных в электронную таблицу для программы MS Excel. На рис. 4 представлен пример сформированного отчета по расчету теплового сопротивления трехжильного кабеля с секторными жилами ААШв 3х240-10.

Результаты расчета теплового и термического сопротивления кабеля между одной жилой и оболочкой	
Результаты расчета теплового (термического) сопротивления трехжильных кабелей с секторными жилами и поясной изоляцией	
Параметры	Значения
Термическое сопротивление T1, К·м/Вт	0,5737
Тепловое сопротивление R1, К/Вт	0,0006
<u>Исходные данные:</u>	
Наружный диаметр поясной изоляции, мм	43
Радиус окружности, описанной вокруг жил, мм	18
Диаметр круглой жилы с такой же площадью поперечного сечения и степенью уплотнения, что и фасонная жила, мм	17,5
Толщина изоляции между жилами, мм	6
Удельное тепловое сопротивление изоляции, К·м/Вт	6
Длина кабеля, м	1000

Рис. 4. Пример формирования отчета о результатах расчетов программы

Сформированный отчет состоит из таблиц с исходными данными и результатами расчетов тепловых и термических сопротивлений, находящихся на пяти листах программы MS Excel.

Основные преимущества компьютерной программы «Thermal Resistance» – это точность и оперативность производимых вычислений, а также простота пользовательского интерфейса.

В соответствии с [4] формулы, использованные при написании программы, являются «достаточно точными и в то же время позволяют варьировать некоторые важные параметры». Эти параметры можно разделить на группы:

а) параметры, относящиеся к конструкции кабеля (например, удельное тепловое сопротивление изоляционного материала), для которых были выбраны характерные значения, основанные на опубликованных работах;

б) параметры, относящиеся к условиям окружающей среды, которые могут быть очень разнообразны, выбор этих параметров зависит от страны, в которой используются или должны использоваться кабели;

в) параметры, которые принимают по соглашению между изготовителем и потребителем и которые касаются запаса надежности работы кабеля (например, максимальная температура жилы).

Области применения программы «Thermal Resistance»

Можно выделить две основные области применения программы «Thermal Resistance»: при проектировании систем электроснабжения и при эксплуатации ка-

бельных линий. В первом случае программа может быть использована для окончательной оценки нагрузочной способности силового кабеля, выбранного в проекте, путем расчета температуры жилы в соответствии с [2] по формуле

$$\theta = P \sum_i R_i, \quad (1)$$

где P – суммарные потери активной мощности в кабеле в режиме аварийных перегрузок; R_i – тепловые сопротивления, рассчитанные программой «Thermal Resistance».

Если значение величины θ , рассчитанное по (1), выше максимально допустимой температуры изоляции жилы для выбранного кабеля, то в процессе проектирования допущены ошибки. Если же это значение ниже максимально допустимого на 20 °С и более, то кабель будет существенно недогружен, что также свидетельствует о недоработках в проекте.

Отметим, что оценка стойкости кабеля к токам короткого замыкания производится, как правило, на основе термического импульса [5]. Эта методика базируется на тепловом расчете кабеля и максимально упрощена для выполнения вычислений с помощью калькулятора. С учетом развития современных средств вычислений ее можно признать устаревшей и пользоваться предлагаемой программой «Thermal Resistance» в совокупности с математической моделью тепловых процессов [3].

На этапе эксплуатации программа «Thermal Resistance» может быть использована в составе программного обеспечения устройства для диагностирования силового кабеля по тепловым параметрам [6].

Заключение

Компьютерная программа «Thermal resistance», разработанная на основе методики ГОСТ Р МЭК 60287-2-1–2009, позволяет автоматизировать процесс расчета тепловых сопротивлений элементов кабеля. Автоматизация расчета, учитывающая различные условия прокладки кабеля, позволит инженеру обоснованно производить выбор токоведущих частей на стадии проектирования и при эксплуатации систем электроснабжения.

Разработанная программа может быть применена для автоматизации производственных расчетов на предприятиях, в проектных организациях, а также в рамках учебного процесса студентов вузов.

Гибкость пользовательского интерфейса, производительность и адаптивность позволяет в дальнейшем рассматривать вопрос о развитии функциональных возможностей программы.

Литература

1. Силовые кабели на напряжение 10–500 кВ: история развития и перспективы / Г. И. Мещанов [и др.] // Наука и жизнь. – 2006. – № 3. – С. 18–24.
2. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1–2009 «Кабели электрические. Вычисление номинальной токовой нагрузки. Часть 1–1. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100%-й коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения».
3. Зализный, Д. И. Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля / Д. И. Зализный, С. Н. Прохоренко // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2012. – № 5. – С. 25–34.
4. ГОСТ Р МЭК 60287-2-1–2009 «Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 2–1. Тепловое сопротивление. Расчет теплового сопротивления».

5. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. И. Кудрин, В. В. Прокопчик. – Минск : Выш. шк., 1988. – 357 с.
6. Патент РБ 7281, МПК (2011) H02H6/00. Устройство для выявления аномального нагрева одножильного силового кабеля / Д. И. Зализный, Д. М. Лось. – Заявл. 03.11.2010 ; опубл. 30.06.2011. – 4 с.

Получено 28.10.2013 г.

УДК 621.313.333

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Н. В. ГРУНТОВИЧ, И. В. ПЕТРОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

П. М. КОЛЕСНИКОВ

ОАО «Гомельтранснефть «Дружба», Республика Беларусь

Введение

Отказы силовых маслонаполненных трансформаторов 110–330 кВ приводят к большим экономическим потерям как на промышленных предприятиях, так и в энергосистеме Республики. В табл. 1 приведены отказы силовых трансформаторов в 1994–1998 гг. [1].

Таблица 1

Отказы силовых трансформаторов

Компонент	Вид повреждения	Число отказов в общем числу, %
1. Обмотки	Электрический пробой	34
	Механические деформации	10,7
	Термический износ	1,6
	Всего	26,4
2. Главная изоляция обмоток и отводов	Диэлектрический пробой, частичные или ползущие разряды	14
3. Остов, электромагнитные шунты	Перегрев, искрение в масле	8,3
4. Отводы	Повышенный нагрев, механические повреждения	4,1
5. РПН	Перегрев контактов	8,3
	Повреждение или частичные разряды (ЧР) в изоляции	5,0
	Механические нарушения	0,83
	Всего	14
6. Вводы	Пробой внутренней изоляции	28
	Перегрев контактных соединений	5
	Всего	33
Итого		100

Разные авторы приводят другие цифры. Например, имеются такие данные: отказы вводов – 28 %, отказы обмоток – 29 %.

Капитальный ремонт трансформатора стоит 50–70 % от стоимости нового в зависимости от объема работ, а стоимость нового трансформатора – в среднем, 15–20 \$ США за 1 кВА с учетом мощности [2].

Проблема старения высоковольтного электроэнергетического оборудования является крайне актуальной как для Республики Беларусь, так и для других стран. На-

пример, в США по состоянию на 1997 г. около 65 % силовых трансформаторов отработали более 25 лет, в Японии более 30 % парка трансформаторов старше 30 лет, в России около 50 % основных фондов электроэнергетики имеют наработку более 25 лет. По состоянию на конец 2005 г., средний срок эксплуатации электрооборудования Украины уже превышает половину проектного, что приводит к снижению надежности его функционирования, возрастанию аварийности [1], [2]. Обеспечение эксплуатационной надежности трансформаторов в условиях, когда темпы старения значительно опережают темпы их замены, возможно за счет разработки новых технологий и практических методов оценки их технического состояния. Наиболее квалифицированное решение по повышению надежности трансформатора может быть получено с применением методов экспертных систем, разработки которых успешно ведутся как в Украине, России, так и в Республике Беларусь.

Целью статьи является анализ принципов построения и функциональных возможностей экспертных систем, используемых для диагностирования высоковольтных маслонаполненных трансформаторов.

Решение задачи

За последние десятилетия разработан ряд эффективных методов технического диагностирования трансформаторов как во время работы под нагрузкой (хроматография, тепловизионный контроль, физико-химический анализ масла, регистрация частичных разрядов, измерение вибрации бака трансформатора), так и после отключения трансформаторов от сети (измерение потерь x_x и Z_k , коэффициент поляризации, измерение омического сопротивления обмоток). В последнее время $tg \delta$ вводов пытаются измерять во время работы в автоматическом режиме.

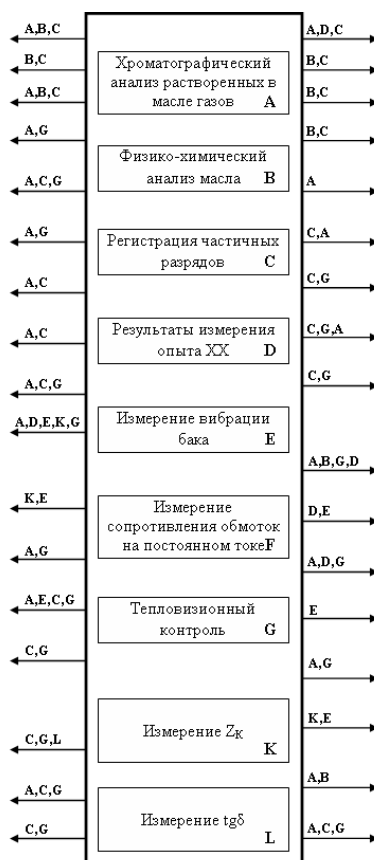


Рис. 1. Методы обнаружения дефектов, где A, B, C, D, E, F, G, K, L – условные обозначения дефектов

После накопления определенного опыта в диагностировании трансформаторов целый ряд фирм России и Украины начали разработку экспертных систем. В табл. 2 представлен сравнительный анализ одиннадцати систем, разработанных до коммерческой стадии, имеющих опыт эксплуатации [3].

Таблица 2

ЭС диагностики маслонаполненного оборудования

Название диагностической системы	Информационные объекты					Выполняемые задачи								Стадия разработки и опыт работы		
	Трансформаторы, реакторы	Высоковольтные вводы	Измерительные трансформаторы	Выключатели	ОПН, разрядники, кабели	Диагностика	Планирование ТОиР	Интерпретация ХАГГ/Расчет хроматограмм	Анализ повреждаемости	Справочная система	Экономическая оценка, ранжирование	Динамическая система	Коммерческие образцы	Опытные образцы	Начало внедрения	Количество внедрений
«Диана», Чирков С. Л.	+	+	+	+	+	+	+						+		1990	8–10
«ДиаХром-2000/Полихром», МЭИ	+	+				+	+	/+					+		1991	100
«ЭДИС Альбатрос», УГТУ	+	+	+	+		+	+	+/	+		+		+		1991	200
«Диагностика+», ИГУ	+	+	+	+	+	+	+	+/		+		+	+		1992	30
«MultiTest», Владимирэнерго	+	+	+	+	+	+	+						+		1993	30
«Трансформатор/ Элхром», ВЭИ	+					+		/+						+	1987	3–6
«Хроматэк Аналитик/Энергетик», ЗАО «Хроматэк»	+	+				+		/+					+		1995	400
«Диагностика СТ», Донецкая ЭС, Украина	+					+							+		1995	5–10
«ИС диагностики состояния ЭО» ЭТЛ-Сервис, Украина	+	+	+			+	+	+		+			+		2000	7–9
«АС для оценки тех состояния ЭО», ДонОГРЭС	+	+	+	+	+	+	+			+				+	2001	1
«Диагностика СТ», ОАО «Транснефтьналадка»	+	+				+								+	2002	1–3

Ценность экспертных систем проявляется в нескольких аспектах:

- сбор, уточнение, кодирование и распространение экспертных знаний;
- решение проблем, сложность которых превышает человеческие возможности;
- решение проблем, требующих объема знаний, которого один человек не в состоянии охватить;
- решение проблем, для которых требуются экспертные знания из нескольких областей;
- сохранение наиболее уязвимой ценности коллектива – коллективных знаний и памяти.

Более 30 параметров должен контролировать эксплуатационный персонал, чтобы определить техническое состояние различных узлов, деталей и частей трансформатора. Только анализ трансформаторного масла должен проводится по 13 критериям.

На рис. 2 представлена функциональная схема экспертной системы, разработанная группой специалистов ОАО «Белгорхимпром» под руководством профессора Н. В. Грунтовича.

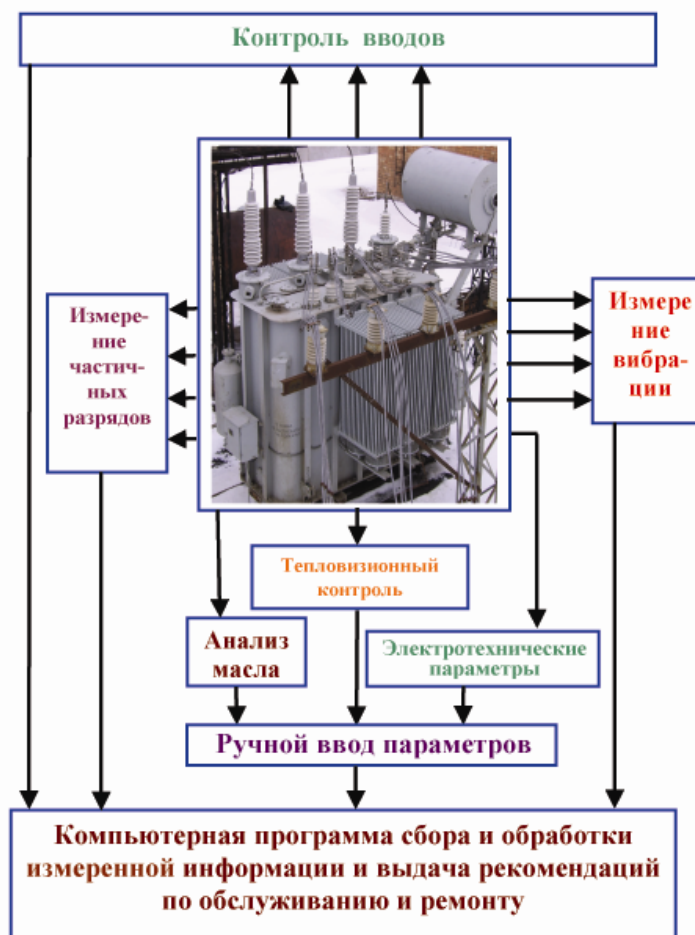


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной системы технического диагностирования трансформаторов 110–330 кВ

Разработанная экспертная система диагностирования трансформаторов решала следующие задачи:

- создание банка дефектов, признаков и выдача протоколов по результатам диагностирования;
- определение остаточного ресурса и аварийного состояния трансформатора по уровню вибрации;
- определение остаточного ресурса и аварийного состояния трансформатора по уровню частичных разрядов;
- определение остаточного ресурса и аварийного состояния трансформатора по результатам термографического обследования;
- определение остаточного ресурса и аварийного состояния вводов 110 кВ по комплексу параметров;
- определение остаточного ресурса и аварийного состояния трансформатора по концентрации газов, растворенных в масле;

– локализация дефектов в трансформаторе по результатам контроля электротехнических параметров;

– определение остаточного ресурса и аварийного состояния трансформатора по величине частичных разрядов и уровню вибрации.

Для выявления дефектов в экспертных системах используются эталоны и различные математические модели. Эталоны могут быть представлены в табличной форме (табл. 3 и 4).

Таблица 3

Физико-химический анализ масла

Дата измерения	Пробивное напряжение, кВ	Кислотное число, мг КОН/г	Температура вспышки, °С	Влагосодержание, г/т	Содержание механических примесей, %	tgδ, % 90 °С	Содержание водорастворимых кислот и щелочей, мг КОН/г
Бак							
норма	35	0,25	125	30	13	15	0,014
14.03	79	0,005	136	8	12	0,695	отсутствует

Таблица 4

Хроматографический анализ растворенных в масле газов

Дата измерения	Концентрация растворенных в масле газов, ppm (мкл/л)						
	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
Бак							
Граничные значения	0,01	0,01	0,06	0,8	0,01	0,005	0,001
14.03	0,0069	0,0089	0,045	0,13	0,0014	0,0106	0,00006

Эталоны могут быть представлены в виде графиков виброакустических характеристик (рис. 3).

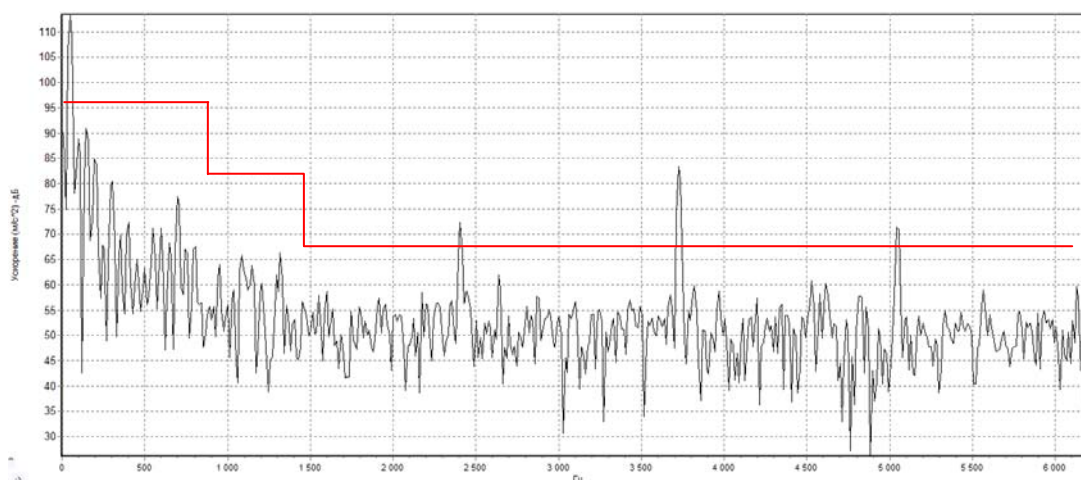


Рис. 3. Виброакустическая характеристика трансформатора

Хроматографический анализ газа может быть представлен в виде графиков-эталонов (рис. 4).

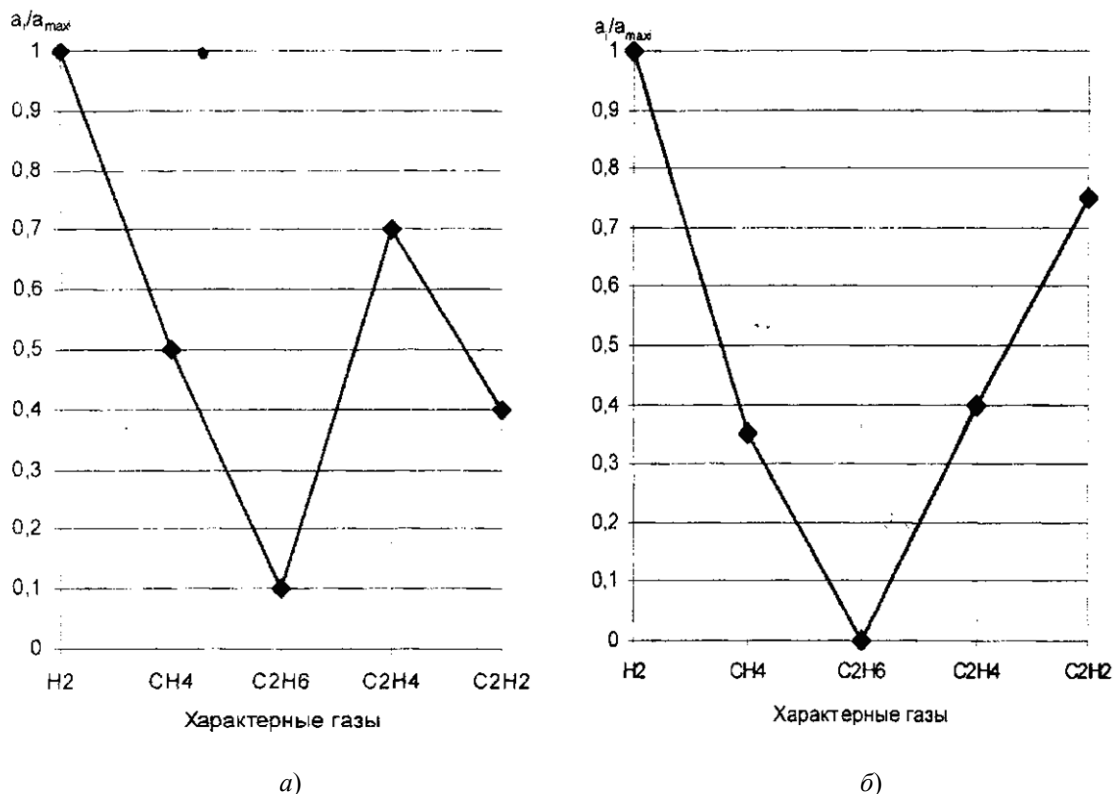


Рис. 4. Хроматографический анализ газов, вызванных:
а – искрением; б – дугой

Заключение

1. Экспертные системы позволяют сохранять и формализовать большой объем знаний специалистов экспертов, которые можно использовать как для практического диагностирования, так и для обучения специалистов по эксплуатации трансформаторов.
2. Экспертные системы технического диагностирования трансформаторов строятся по модульному принципу. Количество модулей зависит от объема решаемых задач.
3. Из опыта эксплуатации трансформаторов следует, что стационарными системами контроля должны быть системы диагностирования вводов и интегральная оценка горючих газов. Остальные системы могут быть мобильными и устанавливаться для мониторинга предотвращения аварийных ситуаций.

Литература

1. Агопян, Г. Е. Основные принципы системы технической диагностики маслонаполненного электрооборудования высокого напряжения / Г. Е. Агопян, В. В. Смекалов, П. М. Сви // Электрические станции. – 1991. – № 3.
2. Бедерак, Я. С. Построение систем мониторинга силовых трансформаторов / Я. С. Бедерак, Ю. Л. Богатырев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://silovoytransformator.ru>.
3. Шутенко, О. В. Анализ функциональных возможностей экспертных систем, используемых для диагностики состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования / О. В. Шутенко, Д. В. Баклай. – НТУ. – ХПИ.

Получено 12.11.2013 г.

УДК 338.439.02

ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ: СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Г. В. КРУГЛЯКОВА, А. М. ТИТОРЕНКО

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Главная цель социально-экономического развития Республики Беларусь на 2011–2015 гг. – рост благосостояния и улучшения условий жизнедеятельности населения, что определяет социальную направленность развития экономики страны на этот период. Одной из составляющих социально-экономического развития общества является продовольственная безопасность государства. Национальная продовольственная безопасность определяется общим состоянием и динамикой экономики. Она обеспечивает стабильность в снабжении населения продуктами питания на основе научно обоснованных норм, а перерабатывающей промышленности – сырьем. Основу создания и поддержания продовольственного потенциала, в первую очередь, обеспечивают сельскохозяйственное производство и продовольственные возможности населения. При этом продовольственная безопасность может быть достигнута при условии гарантированного физического и экономического доступа к продовольствию. Глобально продовольственная безопасность населения земного шара может быть обеспечена только при условии поставки продукции сельскохозяйственного производства на мировые рынки. Это означает, что при решении вопросов продовольственной безопасности необходимо тесное взаимодействие всех стран. Количественное обеспечение продовольственной безопасности не может рассматриваться обособленно от его качественной составляющей: обеспечения населения мира и его отдельных регионов доброкачественными, не наносящими ущерба здоровью населения продуктами.

В литературе вопросам продовольственной безопасности Республики Беларусь уделяется значительное внимание. Так, З. М. Ильиной [1] исследованы методологические и практические аспекты безопасности в сфере продовольствия, выявлены тенденции, закономерности и проблемы развития мировой продовольственной системы [2]; В. Г. Гусяковым и другими исследователями [3] определена динамика устойчивости безопасности в сфере продовольствия, а также особенности ее обеспечения в посткризисный период; О. Стешиц выполнен анализ состояния продовольственного рынка [4].

Цель данной работы – оценка этапов выполнения Концепции национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь, принятой в 2004 г., а также исследование проблем дальнейшего обеспечения населения продуктами питания.

Содержание Концепции национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь

Римская декларация «О всемирной продовольственной безопасности» и «План действия всемирной встречи по проблемам продовольствия» содержат общие принципы продовольственной безопасности и пути их решения. Основой обеспечения

продовольственной безопасности определено общее тесное взаимодействие всех стран мира [2, с. 8–10].

Концепция национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь была разработана и принята Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 10 марта 2004 г. № 252 [5].

В Концепции четко определено понятие «продовольственная безопасность», определены пути ее достижения, обоснована база выполнения программы продовольственного обеспечения населения – развитие сельскохозяйственного производства, выделены внутренние и внешние угрозы в реализации программы. Кроме того, в Концепции продовольственной безопасности приведена методология оценки национальной продовольственной безопасности, ее показатели и параметры.

Продовольственная безопасность республики определена как состояние экономики, при котором государство способно гарантировать покрытие потребности в продовольствии на уровне обеспечения нормальной жизнедеятельности населения. Выделены основные вопросы экономической политики, динамики производства сырья и продовольствия, состояния внутреннего рынка и его взаимосвязи с мировым, социальное положение и платежеспособность населения. Концепция продовольственной безопасности республики предусматривает ее обеспечение за счет собственного производства на уровне 80–85 % и 15–20 % – доля импорта-экспорта.

Развитие собственного производства сельскохозяйственной продукции создает у государства и населения основу их достаточности, страхует от рисков, которые могут возникнуть во взаимоотношениях со странами-экспортерами (гибель урожая, ограничения импорта, рост цен и др.)

Питание человека как залог здоровья и жизнедеятельности нации должно быть разнообразным, учитывать национальные традиции. В этом случае оно обеспечивает покрытие потребности организма в энергетических, биологически активных, вкусовых и других компонентах. Такие подходы положены в основу продовольственного аспекта оценки достижения продовольственной безопасности и определяют физиологические и платежеспособные границы спроса на продукты питания на внутреннем рынке.

Потребление основных продуктов питания в республике на душу населения в год и медицинские нормы потребления приведены в табл. 1.

Таблица 1

Потребление основных продуктов питания в Беларуси на душу населения в год, кг

Продукция	Медицинская норма потребления	Годы						
		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Хлеб и хлебобулочные изделия	105	96	94	93	91	87	86	82
Молоко и молочные продукты	393	262	257	253	237	228	247	281
Мясо и мясопродукты	80	62	68	71	76	78	84	88
Рыба и рыбопродукты	18,2	18,6	17,7	17,8	16,1	15,4	15,8	14,0
Масло растительное	13,2	14,7	14,2	15,9	15,7	14,9	15,9	16,2
Яйца, шт.	294	259	279	280	283	289	292	310
Картофель	170	183	190	191	192	184	183	186
Овощи и бахчевые культуры	124	127	134	138	143	146	149	145
Сахар	33	39,1	36,6	34,7	39,7	40,7	41,1	42,0
Фрукты и ягоды	78	47	60	59	60	61	65	58

Примечание. Таблица составлена по [6], [7].

Беларусь является страной с индустриально-аграрным характером экономики, что обеспечивается наличием достаточных земельных и трудовых ресурсов, развитием отраслей перерабатывающей промышленности. Следствие этого – значительная доля производства республики в мировом производстве сельскохозяйственной продукции. Так, по производству картофеля в 2011 г. доля Беларуси в мировом производстве составила 2,4 %, а по производству и потреблению на душу населения (815 и 186 кг соответственно) страна заняла первое место [8, с. 40].

В Концепции продовольственной безопасности определены критические и оптимальные уровни сельскохозяйственного производства (табл. 2).

Таблица 2

Уровни производства сельскохозяйственной продукции

Производство	Уровень		
	оптимальный	критический	фактический 2011 г.
Зерно, млн т	8,0–9,0	5,5–6,0	8,273
Картофель, млн т	9,0–10,0	6,0–6,5	7,148
Овоши, млн т	1,5–1,7	0,8–1,0	1,816
Плоды и ягоды, млн т	0,7–0,8	0,35–0,45	0,302
Молоко, млн т	7,0–7,5	4,2–4,5	6,500
Мясо всех видов (живой вес), млн т	1,3–1,5	0,9–1,0	1,464
Сахар-песок (из собственного сырья), тыс. т	250	150–180	985,5
Масло растительное, тыс. т	60	40–45	181,7

Примечание. Таблица составлена по [2], [6], [7].

Оптимальные уровни предусматривают такие продовольственные и сырьевые объемы, которые покрывают потребление на душу населения в соответствии с научно обоснованными нормами, формируют необходимые фонды, резервы и экспорт.

Критический уровень сельскохозяйственного производства характеризует его объемы, ниже которых наступает зависимость от импорта, ослабление экономической безопасности страны [2, с. 10].

Приведенные в табл. 2 данные свидетельствуют, что по ряду продуктов (овощам, сахару-песку, маслу растительному) производство превысило не только критический, но и оптимальный уровни. Критический уровень также превзойден по производству зерна, картофеля, молока.

Безусловно, основной целью Концепции является обеспечение продовольственной безопасности государства на оптимальном уровне [2]. Но производители могут предложить свою продукцию, а купить ее должен потребитель, т. е. производственная сфера призвана обеспечить физическую доступность продовольствия: все его виды в достаточном количестве и ассортименте с учетом поставок спецпотребителям, а также соответствующего качества. Потребитель же должен иметь возможность приобрести товар. Эта сторона продовольственной безопасности характеризует ее экономическую доступность, т. е. возможность приобретения товара разными социальными группами населения, что обеспечивается определенными уровнями цен на продукты питания и доходов потребителей. На момент принятия Концепции продовольственной безопасности считалось, что расходы на продовольствие не должны составлять более 50 %, запланированная на будущее цифра – 30–35 % от общих расходов населения.

Помимо физической и экономической доступности продовольствия населению есть и относительные характеристики: коэффициент доступности по основным видам продовольственных товаров – 1,1; коэффициент достаточности по стоимости

рациона – 0,74; энергетической ценности – 0,86. Отмечено также, что уровень потребления в республике выше критического, – 60 % [2, с. 8–10].

В 2011 г., как видно из приведенных данных, продовольственная безопасность страны была оценена несколько ниже оптимального уровня, но критический уровень не достигнут только при производстве плодов и ягод.

Современное состояние продовольственной безопасности Республики Беларусь

Состояние сельскохозяйственного производства продукции как основы обеспечения продовольственной безопасности населения постоянно улучшается. Это подтверждают статистические данные (табл. 3) [9].

Таблица 3

Динамика продукции сельского хозяйства в хозяйствах всех категорий

Показатели	Годы						
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Продукция сельского хозяйства в текущих ценах, млрд р.	12880	15632	18207	25219	26799	36131	55642
В % к предыдущему году (в сопоставимых ценах)	101,7	105,9	104,1	108,9	101,0	102,5	106,6
В процентах к 2000 г. (в сопоставимых ценах)	124,8	132,2	137,6	149,8	151,3	155,1	165,3

При общем росте производства в текущих ценах в 2011 г. по сравнению с 2005 г. в 4,3 раза отмечается высокая колеблемость по отношению к предшествующему периоду. По отношению к 2000 г. производство сельскохозяйственной продукции возросло в сопоставимых ценах со 125 % в 2005 г. до 165 % в 2011 г., при этом ежегодный прирост составлял 1,6–6,6 %. Пики наиболее значимого сельскохозяйственного производства отмечены в 2008 и 2011 г., в остальные периоды процесс носит более равномерный характер.

Причиной недоборов или резкого роста объемов сельскохозяйственной продукции чаще всего служат погодно-климатические условия. Влияет также изменение посевных площадей, демографические и иные процессы в экономике и жизни общества.

Общие посевные площади сельскохозяйственных культур в хозяйствах всех категорий с 6155 тыс. га в 2000 г. при значительной колеблемости по периодам снизились до 5799 тыс. га в 2011 г. Они возросли под зерновыми и зернобобовыми культурами на 135 тыс. га, уменьшились под картофелем и овощами соответственно на 316 и 25 тыс. га. Изменяется также соотношение городского и сельского населения. В 2000 г. соотношение городского и сельского населения было 2,3:1, а в 2010 г. оно составило 3:1, т. е. процесс урбанизации продолжается.

Картина потребления (в процентах) различных пищевых продуктов на душу населения в 2011 г., показанная на рис. 1, отражает дисбаланс фактического потребления относительно научно обоснованных норм.

Фактическое потребление превышает нормативное в основном по углеводосодержащим продуктам (картофель, овощи и бахчевые, сахар), а также по маслу растительному, мясу, яйцам.

Превышение потребления сахара над физиологической нормой составило 27 %. Как известно, сахар быстро преобразуется в организме в жиры, что приводит к избыточному весу со всеми вытекающими из этого для человека последствиями. Подобная тенденция характерна для многих стран мира. К тому же потребление растительного масла также превышает физиологическую норму на 23 %, в то время как в питании употребляются и другие виды жиров – животные, включая масло из коровьего молока,

комбинированные. Отмечено потребление молока на уровне 72 % от физиологической нормы, рыбы и рыбопродуктов – 77 %, плодов и ягод – 74 %. Почти на уровне норм находится потребление мяса и мясопродуктов, яиц. Как положительную тенденцию следует отметить уменьшение потребления хлеба и хлебобулочных изделий на 10 кг на душу населения в 2011 г. по сравнению с 2005 г. Традиционно высоким остается потребление картофеля, что является национальной особенностью белорусов.

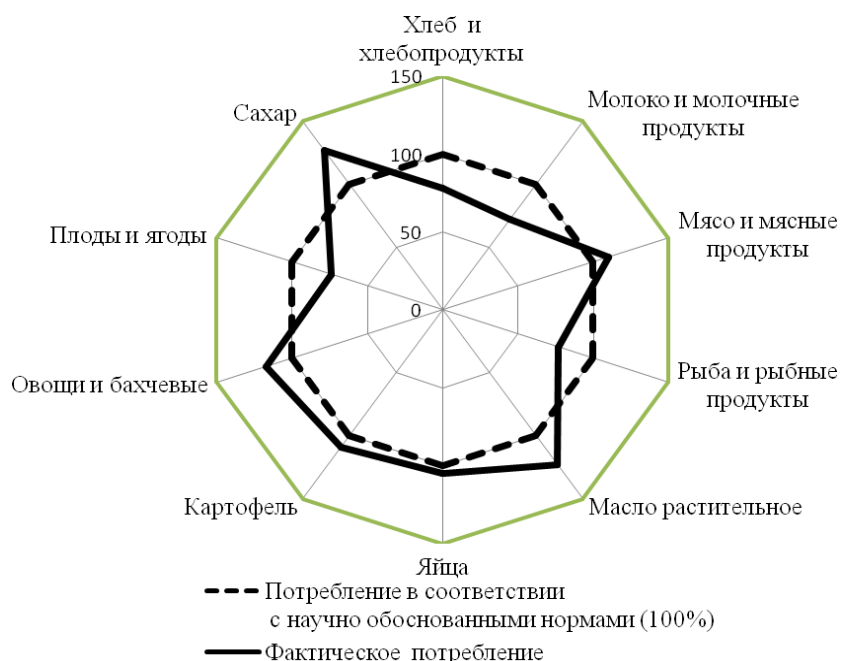


Рис. 1. Соотношение фактического потребления основных продуктов питания в 2011 г. с научно обоснованными нормами

Изменения в питании вызваны реструктуризацией потребительских расходов домашних хозяйств (табл. 4).

Таблица 4

Структура потребительских расходов домашних хозяйств в % [10]

Годы	Расходы всего, % к итогу	На покупку продуктов питания	Из них на покупку		
			хлеба и хлебобулочных изделий	молока и молочных продуктов	алкогольных напитков
2000	100	58,0	13,5	8,4	3,5
2005	100	42,4	7,7	6,3	2,5
2007	100	39,2	6,4	5,9	2,3
2008	100	38,9	6,5	6,3	2,3
2009	100	37,9	6,2	6,5	2,2
2010	100	36,8	5,8	6,4	2,2
2011	100	38,9	5,8	6,5	2,2

На основании данных табл. 4 можно сделать вывод о том, что изменилась структура потребительских расходов домашних хозяйств.

По данным выборочного обследования домашних хозяйств по уровню жизни на закупку продуктов питания в 2000 г. уходило 58 % от общей суммы расходов, за пять лет сумма снизилась до 42,4 %. В 2011 г. она составила 38,9 %. Основную долю

в расходах на питание продолжают составлять мясо и мясопродукты (13,9–12,6 %) и хлеб и хлебобулочные изделия (7,7–5,8 %). Практически не растут расходы на покупку молока и молочных продуктов (6,5 %), плодов и ягод (2,4 %), овощей и бахчевых (1,9 %), а на приобретение рыбы и рыбных продуктов расходы снизились с 3 % в 2005 г. до 1,7 % в 2011 г.

За рассматриваемый период изменилась и покупательная способность среднедушевых располагаемых денежных доходов населения, т. е. количество продуктов питания (каждого отдельно), которое можно было приобрести на величину среднедушевого располагаемого денежного дохода, кг в месяц (табл. 5) [7].

Таблица 5

**Покупательная способность среднедушевых располагаемых
денежных доходов населения**

Наименование продукции	Годы						
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Свинина	45,6	53,8	64,3	70,6	71,6	81,4	67,6
Мясо птицы	58,3	67,2	79,6	84,4	87,0	100,6	83,2
Рыба свежая	66,7	81,3	85,1	98,2	107,1	126,5	89,5
Молоко, л	381,2	445,2	503,0	505,6	499,1	562,7	614,8
Яйца, шт.	1 497	1 798	2 154	2 438	2 445	2 726	2 465
Сахар-песок	211,1	216,8	264,2	322,4	337,2	323,7	272,1
Масло растительное	89,0	110,8	125,6	102,7	151,7	176,7	102,5
Хлеб пшеничный	260,2	297,4	351,5	383,6	386,7	438,7	488,6
Картофель	625,2	504,8	664,3	755,3	747,9	654,1	633,4

Так, практически по всем рассматриваемым продуктам наблюдается (до 2010 г. включительно) постоянное увеличение количества продукции, которое можно было приобрести на величину среднедушевого располагаемого денежного дохода. В 2011 г. этот объем снижается, что говорит о снижении покупательной способности населения. Исключения составляют сахар-песок (тенденция к снижению проявляется уже в 2010 г.), хлеб пшеничный (рост на протяжении всего рассматриваемого периода), картофель (начиная с 2009 г. наблюдается снижение).

Следует отметить, что предусмотренные в Концепции продовольственной безопасности в 2004 г. 15–20 % импорта-экспорта продовольствия успешно выполняются. Так, импорт продукции пищевой промышленности и сырья для ее производства в 2000 г. составил 12,9 %, в 2010 г. – 8,2 % и в 2011 г. – 7,0 %; удельный вес экспорта был соответственно 6,9, 12,9 и 9,5 %.

Показатели внешнеэкономической деятельности республики представлены в табл. 6.

Таблица 6

**Внешнеэкономическая деятельность Республики Беларусь
на рынке продовольственных товаров, тыс. т [11]**

Наименование продукции	Экспорт		Импорт	
	2010 г.	2011 г.	2010 г.	2011 г.
Говядина замороженная	55,8	27,1	0,4	1,7
Свинина	38,8	51,7	66,2	89,6
Мясо и пищевые субпродукты домашней птицы	38,4	75,0	10,3	14,4
Молоко и сливки сгущенные и сухие	195,3	186,1	238,2	484
Яйца, млн шт.	551,1	608,6	11,8	12,7
Сахар	493,4	392,3	407,0	463,2
Картофель	51,6	48,2	21,6	58,5

Анализ экспортно-импортных операций показал, что характер их в течение 2010–2011 гг. не оставался постоянным. Экспорт превышал импорт по такой пищевой продукции, как говядина замороженная, мясо и пищевые субпродукты домашней птицы, яйца, картофель. Свиная, молоко и сливки сгущенные и сухие оставались в 2010–2011 гг. преимущественно импортируемыми продуктами. По ввозу и вывозу сахара картина неоднородная, так как отечественные предприятия не только вырабатывают его из собственного сырья (сахарной свеклы), но и перерабатывают ввозной полуфабрикат – коричневый сахар (в основном, с о. Куба). Также к импортируемым продуктам относятся овощи (томаты, лук, капуста, морковь, огурцы), плоды (цитрусовые, виноград, семечковые и косточковые). Нарращивание импорта возможно только при росте валютных поступлений в республику.

Выводы и проблемные направления

В ходе выполненного нами исследования было установлено, что показатели Концепции продовольственной безопасности Республики Беларусь на период с 2005 по 2011 гг. в целом достигнуты. В 2011 г. производство овощей, сахара песка, масла растительного превысило оптимальный уровень. Критический уровень производства превзойден по зерну, картофелю, молоку, не достигнут только при производстве плодов и ягод.

Сохраняется дисбаланс по отношению к научно обоснованным нормам потребления основных продуктов питания. Превышение фактического потребления по сравнению с нормативным характерно преимущественно по углеводосодержащим продуктам (картофель, овощи, сахар).

Актуальной остается проблема экономической доступности продовольствия для населения. Если с каждым годом (с 2005 по 2010 г.) доля расходов на покупку продуктов питания снижалась, то в 2011 г. наблюдается увеличение этой доли и превышение над запланированным уровнем. Также в 2011 г. неблагоприятно складывается ситуация с покупательной способностью доходов населения по основным продуктам.

На наш взгляд, выявленные в анализе результаты выполнения Концепции продовольственной безопасности Республики Беларусь, характеризуют проблемные направления, требующие решения, а именно:

- в связи с нарушением научных рекомендаций по структуре питания среди населения необходимо активизировать образовательную работу о правильном и здоровом питании;

- хотя Концепция продовольственной безопасности Республики Беларусь предусматривает долю импорта продовольствия до 20 %, необходимо снизить импорт по таким товарам, как свинина, молоко и сливки, картофель, а увеличить по плодам и ягодам. Это позволит использовать имеющийся потенциал предприятий при производстве свинины, молока и сливок, картофеля, а также повысит фактическое потребление плодов и ягод;

- в целях роста покупательной способности доходов населения и снижения доли расходов на питание оптимальным направлением будет снижение себестоимости отечественной сельскохозяйственной продукции.

Литература

1. Ильина, З. М. Глобальные проблемы и устойчивость национальной продовольственной безопасности. В 2 кн. Кн. 1 / З. М. Ильина. – Минск : Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси, 2012. – 211 с.
2. Ильина, З. Продовольственная безопасность: сущность, проблемы и пути ее решения / З. Ильина // Агроэкономика. – 2004. – № 5. – С. 8–10.

3. Продовольственная безопасность Республики Беларусь. Мониторинг-2011: в контексте вызовов современности / В. Г. Гусаков [и др.]. – Минск : Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси, 2012. – 147 с.
4. Стешиц, О. Анализ состояния продовольственного рынка Республики Беларусь с использованием коэффициента ценовой эластичности спроса / О. Стешиц // Аграр. экономика. – 2012. – № 4. – С. 2–9.
5. О Концепции национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь : Постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 10 марта 2004 г. № 252 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.spravka-jurist.com/base/part-jq/tx_esxgxa/index.htm. – Дата доступа: 31.06.2013.
6. Сельское хозяйство Республики Беларусь : стат. сб. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2013. – 365 с.
7. Беларусь и страны СНГ. Уровень жизни населения : стат. сб. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2012. – С. 41–43.
8. Никитина, И. Перспективные направления развития рынка картофеля / И. Никитина // Аграр. экономика. – 2012. – № 8. – С. 40–44.
9. Статистический ежегодник Республики Беларусь. 2012. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2012. – 715 с.
10. Итоги социально-экономического развития Республики Беларусь за 2010 год. // Экон. бюл. – 2011. – № 2. – С. 4–54.
11. Внешняя торговля Республики Беларусь : стат. сб. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2012. – С. 28–31.

Получено 09.09.2013 г.

УДК 630.906

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ СПЕЛОСТЬ ЛЕСА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

О. В. ЛАПИЦКАЯ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

В Республике Беларусь в настоящее время ежегодно заготавливается свыше 15 млн м³ древесины. По главному пользованию вырубается свыше 9 млн м³, по промежуточному пользованию – около 5 м³ и по прочим рубкам – свыше 1 млн м³. При этом расчетная лесосека по главному пользованию составляет 11,4 млн м³. Она не дорубается около 2 млн м³, в основном, по мягколиственному хозяйству.

Главное пользование леса предполагает сплошные или выборочные рубки спелой древесины. Понятие «спелость» в настоящее время неоднозначно. В лесном хозяйстве существуют разные виды спелости: количественная, техническая, водоохранный, почвозащитная и т. д. [1], [2]. В дореволюционный период существовали также спелости экономической природы: хозяйственная и финансовая [1]–[4].

До недавнего времени в советском лесоустройстве и лесной экономике преобладала точка зрения, что момент рубки леса необходимо определять по спелостям, базирующимся на натуральных показателях выхода древесины. Но уже с конца 50-х гг. прошлого века появились публикации, которые показывают, что помимо количественных критериев о запасах древесины и выходе отдельных сортиментов необходимо учитывать экономический фактор [5], [6].

Поскольку старые экономические категории в виде хозяйственной и финансовой спелостей считались в то время буржуазными и неприемлемыми для применения в социалистическом хозяйстве, то взамен было предложено понятие экономической спелости [5]–[7]. Эволюция этого понятия прошла довольно длительный путь и будет описана ниже. В течение определенного времени термин «экономическая спелость» наполнялся разным экономическим содержанием. Такая неустойчивость термина во времени при сохранении старого названия препятствовала его применению в практике.

В настоящее время понятие об экономической спелости также подлежит пересмотру в силу изменившихся экономических и политических условий ведения хозяйства, что связано с рыночными преобразованиями. По этой причине целесообразно провести анализ истории и современного состояния экономической спелости леса и предложить привести ее определение, соответствующее требованиям рыночной экономики.

Материалы и методика

Материалом для проведения наших исследований послужили открытые статистические и ведомственные источники о заготовке и потреблении древесины, о современных возрастах рубок, цены на древесину в Республике Беларусь и на мировом рынке. Использовались также литературные источники, список которых приведен в настоящей статье.

Методика исследования включала общепринятые экономические, лесоводственные, лесоустроительные методы с применением положений системного анализа и математической статистики [2], [7]–[10].

Результаты и обсуждения

Понятие «спелость леса» появилось у нас в XIX в. В этот период и в начале XX в. в России наибольшее значение имели спелости экономического характера. Из подобных спелостей наиболее были известны хозяйственная и финансовая [2], [3 и др.]. Наиболее полное обобщение спелостей леса и их трактовку дал М. М. Орлов [3], [4]. Среди всех спелостей этот ученый выделял хозяйственную. Он писал, что «...тот возраст дерева или насаждения, в котором при рубке получается наибольший чистый доход, называется возрастом хозяйственной спелости, так как всего более отвечает общим целям хозяйства». Эту величину М. М. Орлов и другие лесоустроители и экономисты [4], [11], [12] называли лесной рентой. Наибольший чистый доход определялся здесь как произведение среднего прироста на одном гектаре и качественной цифры. Последняя представляла собой цену обезличенного кубометра прироста (последствия всего запаса) исследуемого древостоя.

Понятие «хозяйственная спелость» известно со второй половины XIX в. Профессор А. Ф. Рудзкий писал: «Лесной хозяин может получить наибольшую выгоду лишь при срубке леса в том возрасте, на который приходится наибольшее произведение из количественного прироста на качественную цифру. При вырубке в этом возрасте получается наибольший валовый доход, а так как расходы остаются довольно постоянными, то тот же возраст будет соответствовать и наибольшему чистому доходу» [12].

Хозяйственную спелость обычно клали в основу определения возраста рубки в дореволюционное время. Так, В. И. Переход [11] приводит примеры ее использования, взятые из практики лесоустройства на территории Минской губернии.

Бурное развитие промышленности, начавшееся с конца 20-х гг. XX в., перевод экономики СССР на плановое начало требовали новых подходов к определению возраста рубки. В условиях развивающегося социализма принцип наивысшей доходности был заменен на требование максимального удовлетворения потребности народного хозяйства в древесине и основных сортаментах. Плановое хозяйство не могло допустить определение возраста рубки и размера пользования по максимальному размеру лесной ренты и рыночной цене лесоматериалов.

Поэтому усилия ученых в 20–30-е гг. XX в. были нацелены на поиски таких критериев спелости леса, которые оказались бы пригодными в условиях социалистического лесного хозяйства. Особое значение приобрело максимальное удовлетворение потребностей народного хозяйства в определенных сортаментах, которые требовались бурно развивающейся промышленности и для экспорта. При этом предлагалось добиваться максимальной продуктивности лесных насаждений, снижения затрат на лесозаготовки и т. д. Но последние предложения учитывались постольку, поскольку не мешали максимизировать объем лесозаготовок. В лучшем случае они декларировались, но на практике игнорировались [1], [8].

Старые правила лесопользования, которые мешали проведению в жизнь новых принципов, после ожесточенной, но относительно короткой борьбы с учеными классической школы, были отброшены. При этом осудили и изъяли из пользования основополагающий принцип ведения лесного хозяйства – принцип непрерывности, неистощительности и равномерности лесопользования. Не помогла и защита известных ученых – даже классики лесоводства (М. М. Орлов, Г. Ф. Морозов и другие ученые) тоже подверглись ostracism. Это нанесло большой вред нашим лесам, от которого они не оправились до сих пор.

В то же время необходимость экономической оценки продукции лесного хозяйства не могла быть устранена введением только количественных критериев древесины, имеющей определенную потребительную стоимость. Годность к потреблению – это свойство любого товара. Без этого качества он не будет соответствовать своему

назначению. Любой товар являет собой гармоничное сочетание стоимости и потребительной стоимости. В силу этого отторжение от понятия «спелость леса» ее экономической природы неверно.

В XIX и в начале XX в. среди спелостей, имеющих экономическое содержание, наибольшую известность (кроме хозяйственной) получили качественная и финансовая спелости. Качественную спелость ввел профессор А. Ф. Рудзский [12]. Под ней он понимал тот возраст древостоя, когда цена объемной единицы древесины достигает наибольшей величины. Поскольку максимальную цену можно получить лишь за крупные сортименты, то качественная спелость достигалась в насаждениях старого возраста. Например, для хвойных – в 120–140 лет [4], [13].

Установление качественной спелости требовало экономического расчета, так как необходимо знать цену заготовленной древесины. Оценку всей массы стволовой древесины проводят, используя качественную цифру.

Математическое описание для расчета качественной спелости (T_k) дал С. Н. Свалов [14]. Она вытекает из закономерной связи корневой стоимости (C) древесины с возрастом (t), установленной Б. И. Бобруйко [15]:

$$C(t) = a + b \ln t. \quad (1)$$

Из определения $T_k = \max K(t) = \frac{c(T_k)}{m(T_k)}$, где $K(t)$ – частное от деления корневой стоимости $c(t)$ на запас древесины $m(t)$ – несложно найти максимум T_k путем дифференцирования уравнения (1) в соответствии со стандартными процедурами дифференциального исчисления:

$$K'(T_k) = [c(T_k)/m(T_k)]' = [c'(T_k)m(T_k) - c(T_k)m'(T_k)]^2 = 0.$$

Тогда $c'(T_k) = c(T_k)m'(T_k)/m(T_k)$.

Учитывая упомянутую связь корневой стоимости древесины с возрастом (1), получим:

$$T_k = bm(T_k)/[m'(T_k)(a + b \ln T_k)].$$

С. Н. Свалов [14] считает, что зависимость стоимости древесины от возраста лучше описывать формулой Теразаки, т. е. $m(t) = \exp(a_0 - a_1/t)$. Тогда максимум T_k выразится как $T_k = T(a + b \ln T_k)/b$.

Качественная спелость, несмотря на достаточно подробное описание в литературе, не получила практического применения, как в дореволюционной России, так и в СССР [4], [6], [12]. Причина здесь в том, что величина качественной спелости не соответствует времени получения наивысшего дохода от лесовыращивания. Обычно рациональный возраст рубки значительно ниже качественной спелости.

Гораздо более известна в теоретическом и практическом планах финансовая спелость, которая появилась в середине XIX в. в Германии и там же нашла свое практическое воплощение [4], [11], [12], [16]. Под финансовой спелостью ее авторы понимали тот возраст насаждения, когда его вырубка обеспечивала наибольший процент на вложенный капитал [3]. В этом случае ежегодный чистый доход (E), получаемый от некоторого участка леса, рассматривается как процент ($0,0P$) со стоимости леса в целом, т. е. стоимости земли (B) и стоимости древесного запаса (N): $E = (B + N) \cdot 0,0P$ [3], [11]. Из приведенной формулы вытекает, что «процент помещения капитала» выражается здесь как $P = (e/B + N) \cdot 100 \%$.

Впервые идею финансовой спелости сформулировал немецкий лесовод Мартин Фаустман в 1849 г. [16]. Его формула имеет вид:

$$S = \frac{y_1 + \sum T_a \cdot 1,0p^{r-c} - C \cdot 1,0p^n}{1,0p^r - 1} - \frac{e}{0,0p}, \quad (2)$$

где S – ожидаемая стоимость 1 га земли под лесом; y_1 – количество древесины, получаемое к концу оборота рубки; r – период оборота рубки; $\sum T_a \cdot 1,0p^{r-c}$ – количество древесины, полученное от всех промежуточных рубок ухода, каждая из которых отнесена на конец оборота рубки; $C \cdot 1,0p^n$ – затраты, отнесенные на конец оборота рубки; $1,0p^r - 1$ – коэффициент дисконтирования для приведения показателей на начало оборота рубки; $\frac{e}{0,0p}$ – ежегодные затраты на поддержание функционирования лесохозяйственного предприятия.

Правда, для лесного хозяйства понятие «вложенный капитал» отличается от его традиционного понимания, хотя авторы оперируют именно этим термином. Здесь вложенный капитал представляет собой запас леса. Последний не может рассматриваться как обычный капитал, который вкладывается в производство ради получения прибыли.

Финансовая спелость была неоднозначно воспринята с самого ее зарождения, и дискуссии о ее правомерности продолжаются до сих пор. Активным популяризатором этого вида спелости был Ф. Юдейх [17]. В своей книге «Лесоустройство» он весьма положительно оценил работу М. Фаустмана. Н. А. Моисеев и В. С. Чуенков [17] считают, что именно с подачи Ф. Юдейха учение о финансовой спелости попало в англоязычные учебники, где до сих пор последняя выдается за краеугольный камень при исчислении оборота рубки.

Казалось бы, что при переходе к экономическим методам управления народным хозяйством и к рыночной экономике названная спелость должна быть восстановлена в своих правах, как это случилось с принципом непрерывности и постоянства пользования. Но такого не произошло. Правда, на Западе подходы многих ученых базируются на использовании идей М. Фаустмана [16], [18]. В то же время финансовая спелость и прежде, и особенно теперь подвергается интенсивной критике как российскими, так и западными учеными. Достаточно сказать, что финансовая спелость у нас никогда не находила практического применения. Вызвано это тем, что длительный период лесовыращивания, необходимый при установлении оборота рубки по хозяйственной (в царской России) или по технической спелости (в СССР), с точки зрения максимизации земельной или почвенной ренты, а именно в этом заключается экономическая сущность финансовой спелости, не мог быть признан верным. Ведение хозяйства на основе формулы М. Фаустмана приводило к обороту рубки в 40–50 лет. Расчеты, проведенные М. Уиллиамсом [16] для современных условий лесовыращивания и лесопользования в странах Запады, показывают, что древостои требуется рубить не позже 50–55 лет.

Убедительные примеры вреда от практического использования описанного подхода при решении вопросов об оборотах рубки привел R. Plochmann [19]. Он показал, что в Западной Европе, в том числе в Германии, увлечение финансовой спелостью привело к замене широколиственных лесов из дуба и бука хвойными монокультурами. Подобное отношение к финансовой спелости высказал и известный немецкий экономист G. Speidel [20]. В результате предлагается вести хозяйство по выращиванию крупных сортиментов при высоких оборотах рубки.

При использовании финансовой спелости возникают большие проблемы с установлением величины коэффициента дисконтирования. Приняв его равным тем значениям, которые используют в капитальном строительстве или при получении банковских кредитов (7–8 % и больше), выйдем на очень низкий расчетный возраст рубки. Поэтому в СССР в системе лесного хозяйства применялись коэффициенты в пределах 0,01–0,03. Как отмечают О. А. Атрощенко и А. Д. Янушко [18], в странах Центральной Европы коэффициент дисконтирования не применяли, добиваясь максимальной прибыли от продажи леса на корню. В Великобритании планировали не более 3,5 % чистой прибыли на вложенный капитал. Р. Kilkki [21] при расчете оборотов рубки принимал ведущий процент интереса от 0,5 до 5 %, получив при этом расчетные обороты рубки в 70–120 лет.

Ведение лесного хозяйства должно базироваться на максимизации лесной ренты, что приводит к спелостям, отражающим возраст наступления максимальной продуктивности лесов (народнохозяйственная спелость) в сочетании с оптимизацией экологических полезностей леса. Изложенный тезис с неизбежностью приводит к понятию эколого-экономической спелости.

Построение моделей спелостей на базе периодического пользования отдельно взятым участком леса, которое требует дисконтирования разновременных затрат, т. е. использование для установления оборота рубки финансовой спелости, противоречит идее непрерывного и неистощительного пользования и национальным интересам [8], [9].

Современная концепция ведения лесного хозяйства должна строиться на принципе непрерывного и неистощительного лесопользования, который М. М. Орлов [3] характеризовал как принцип постоянства пользования. Здесь все расчеты строятся не на базе одиночного участка, а на их целостной совокупности. Это обеспечивает поддержание насаждений при ведении хозяйства в уравновешенном соотношении. В этом случае, как отмечают Н. А. Моисеев и В. С. Чуенков [9], В. Ф. Багинский и Л. Д. Есимчик [1] и другие ученые, нет нужды дисконтировать текущие затраты. Последняя операция допустима лишь при дополнительных капитальных вложениях, предназначенных для расширенного воспроизводства, например, при создании лесных культур на нелесных землях. Из изложенного вытекает, что доказана научная и практическая несостоятельность финансовой спелости. Поэтому ее основное положение (дисконт на разновременные затраты) нами не учитывается.

М. М. Трубников [13] описывает еще один вид спелости, базирующийся на применении показателей чистого дохода (земельной ренты), – коммерческую. Это тот возраст древостоев, при котором хозяйство получает наибольший чистый доход. Для ее определения сопоставляются затраты на выращивание леса и доходы от реализации древесины. Тот возраст, в котором доходы превышают расходы на наибольшую величину, есть возраст коммерческой спелости [3], [12], [13]. Так как для исчисления коммерческой спелости необходимо подсчитать валовой доход, то она охватывает и содержание хозяйственной спелости. По своей экономической природе коммерческая спелость есть спелость по лесной ренте. Чистый доход является избытком над ценой производства лесного хозяйства и лесной промышленности. В практике советского лесного хозяйства коммерческая спелость применения не получила.

В определенной мере учитывают экономические факторы такие виды спелости, как народнохозяйственная и техническая [1]. Строго говоря, техническая спелость в ее классическом понимании не требует экономических расчетов [2]. Но более поздние исследователи ввели здесь экономические элементы, практически объединив эту спелость с народнохозяйственной [1], [22]. Суть усовершенствований заключается в применении экономических подходов при определении группы ведущих сортиментов, поскольку именно с этого начинается вычисление технической спелости. При

выборе ведущих сортиментов рассчитывают себестоимость заготовки, вывозки и первичной переработки древесины, а также цену основных сортиментов. Таким образом, даже те спелости, которые, казалось бы, должны устанавливаться по чисто натуральным показателям, тоже требуют экономического обоснования.

Отказ от экономических подходов в лесопользовании, нарушение принципов непрерывности и постоянства лесопользования, господствовавшие с конца 20-х и практически до 70-х гг. XX в., нанесли большой ущерб лесам государства. Ученые-лесоустроители и лесные экономисты понимали, что существующая лесная политика 20–60-х гг. ошибочна, если не более. Эти ученые, вынужденные в силу суровых обстоятельств молчать или даже внешне соглашаться с господствующей доктриной в жестокое сталинское время, начали возвращать научные методы организации лесного хозяйства и лесопользования, как только позволила политическая обстановка. Так, уже во второй половине 50-х гг., т. е. в период хрущевской «оттепели», появляются труды, призывающие к использованию в лесном хозяйстве закона стоимости, возврату к принципам непрерывности и постоянства пользования лесом [5], [6]. Возродился интерес к спелостям леса, имеющим экономическую природу. Спелости до-революционного периода, которые имели ранее практическое значение, например, хозяйственная, не вписывались в условия социалистического производства и не могли быть приняты [5].

Потребовалось найти новые подходы к установлению спелостей. Они должны были иметь экономическую основу и соответствовать современному уровню развития лесохозяйственного производства, базирующегося на государственной собственности на леса и социалистическом способе производства. Таким видом спелости оказалась экономическая.

Уже в 1957 г. Е. Я. Судачков писал, что спелость надо понимать экономически, рассматривая спелый лес как единство потребительной стоимости и стоимости, т. е. общественного труда, как живого, так и прошлого. Далее он отмечал, что спелость леса есть понятие, содержащее экономические, лесоводственно-биологические и технические элементы при ведущем, определяющем значении экономических факторов.

Поскольку (согласно Е. Я. Судачкову [6]) экономический фактор является основным в содержании спелости леса, то решающее значение приобретает определение величины затрат общественного труда на производство единицы объема материальной продукции. При этом должна учитываться совокупная величина трудовых затрат на выращивание леса и его эксплуатацию: заготовку и вывозку лесоматериалов. Вследствие несовершенства существующих такс и их изменений при расчетах оптимального возраста спелости, связанного с длительными сроками, Е. Я. Судачков считает, что нельзя придавать решающее значение показателям рентабельности лесохозяйственного производства. Основным стоимостным показателем ученый предлагает считать величину себестоимости единицы объема, выраженную в условно-натуральных единицах. По понятию Е. Я. Судачкова, экономическая спелость – тот возраст древостоя, когда его рубка дает максимальный чистый доход, составляющий разницу между стоимостью запаса древостоя на корню и себестоимостью его выращивания.

Впервые термин «экономическая спелость леса» сформулировал Ф. Т. Костюкович [5] как возраст достижения минимальной себестоимости выращивания 1 м³ древесины.

В 60-е гг. XX в. капитальную работу по исследованию экономической спелости леса выполнил М. М. Трубников, что нашло отражение в его монографии [13]. М. М. Трубников при разработке методов определения экономической спелости основное внимание уделил себестоимости лесовыращивания. Рассмотрев все виды спелости, в том числе имеющие экономическую природу: хозяйственную, качественную, финансо-

вую и другие, он их отверг в духе своего времени как инструменты капиталистического лесного хозяйства, где в основе стоимости лесоматериалов лежат рыночные цены и цена земли. Экономическая спелость леса, по мнению М. М. Трубникова [18], базируется на отыскании того возраста древостоя, когда сумма затрат на лесовыращивание и лесосечные работы в расчете на 1 м³ древесины окажется минимальной.

Работа М. М. Трубникова [13] была значительным шагом вперед для своего времени, но практической реализации метод не получил. Методика М. М. Трубникова имела существенные недостатки: минимум затрат еще не свидетельствует о максимуме воспроизводства древесного продукта [7], [9]. Поэтому исследования экономической спелости были продолжены.

В зарубежных (западных) странах при проведении подобных расчетов, в основном, идут по пути максимизации прибыли через максимум прироста древесины [21]. Детальный разбор зарубежных (западных) методов определения спелостей экономической природы и оборота рубки сделали О. А. Атрощенко и А. Д. Янушко [18]. Ими описаны подходы для получения наибольшей прибыли от реализации леса на корню (GCR) в зависимости от расходов на лесовосстановление (C_n), лесоправление (C_y) и ежегодной стоимости древесины на корню (NCR), которые разработаны финскими учеными К. Kuusela и А. Nyysönen, т. е. $GCR = NCR - (C_y + C_n)$. Ими показано различие в принципах оптимизации процесса производства древесины в Центральной Европе и Великобритании. В первом случае максимизируется прибыль от продажи леса на корню, во втором стремятся к получению не менее 3,5 % ежегодной чистой прибыли на вложенный капитал.

При анализе зарубежных моделей экономической спелости леса О. А. Атрощенко и А. Д. Янушко отмечают, что основным продуктом лесопользования является древесина на корню, а другие продукты и полезности не учитываются. При этом цены на древесину и затраты на лесоправление, а также производительность древостоев рассматриваются как стабильные. Если последняя составляющая (производительность), действительно, относительно стабильна, то цены и затраты подвержены постоянному изменению.

О. А. Атрощенко и А. Д. Янушко отмечают, что исследованиями W. Bently и D. Teegarden показано, что все зарубежные модели экономической спелости взаимосвязаны и могут быть описаны общей моделью получения чистой прибыли от лесовыращивания (Π) при некотором ведущем проценте интереса (P):

$$\Pi = \frac{T(t) - C_n(1+P)^t - [C_3(1+p)^t - C_3]}{(1+p)^t - 1} \rightarrow \max, \quad (3)$$

где $T(t)$ – функция времени $T = \varphi(t)$; C_n и C_3 – соответственно стоимость лесовосстановления и земли; T – таксовая стоимость древесины.

С помощью этой модели (3) определяют экономическую спелость леса в возрасте максимума таксовой стоимости древесины за период t , т. е. $T(t) \rightarrow \max$ при одном обороте рубки. Модель служит для определения того возраста, когда $[T(t)/t] \rightarrow \max$.

В нашей стране интерес к экономической спелости вновь возник в 80-е гг. XX в., особенно с началом «перестройки» и провозглашения примата рыночной экономики. Здесь выделились два главных направления. Одно из них развил Н. А. Моисеев [9] и его школа [14], [23]. Другое направление сформулировал А. Д. Янушко [7], [8].

В названных подходах есть определенное сходство и существенные различия. Н. А. Моисеев [9] пришел к выводу, что экономическая спелость леса – это тот возраст древостоя, когда достигается максимум среднегодового чистого дохода, т. е.

наблюдается максимальная разница между оптовой ценой лесопродукции и себестоимостью воспроизводства леса и затрат на заготовку древесины. Математически возраст экономической спелости (согласно Н. А. Моисееву) С. Н. Свалов [14] выразил как максимальный среднегодовой чистый доход $D(t)$ с учетом приведенных затрат на воспроизводство $(C(T))$ и заготовку леса (Z) , т. е. $\max D(t) = [C(T_s - Z_0)]/T_s - Z$. Здесь Z – годовые денежные затраты на ведение лесного хозяйства, отнесенные к 1 га. В принципе, формула может отражать как таксовую стоимость древесины, так и цену готовых лесоматериалов. В первом случае Z_0 выразит денежные затраты на восстановление 1 га леса, а во втором сюда добавится стоимость лесозаготовок на 1 га. Из данной формулы следует, что максимумом этой функции явятся корни уравнения после взятия первой производной, т. е. $D'(T_s) = [C'(T_s) - C(T_s) + Z_0]/T_s^2 = 0$. Решая его относительно T_s , получаем $T_s = [C(T_s) - Z]/C'(T_s)$.

В. Д. Волков [24] дополнил метод Н. А. Моисеева, учтя стоимость недревесных и несырьевых ресурсов. Он показал, что в хозяйствах с непрерывным и равномерным лесопользованием максимальную земельную ренту $\max B(t)E$ можно получить в возрасте экономической спелости T_s , когда капитальная стоимость лесной земли определяется соотношением $B(T_s) = [c(T_s) - Z_0 - Z_1 T_s]/(ET_s)$, где E – параметр дисконтирования. Максимум $B(t)$ получим из дифференциального уравнения $B'(T_s) = \{c'(T_s)ET_s - E[c(T_s) - Z_0]\}/(ET_s)^2 = 0$. Решая приведенное уравнение, приходим к $T_s = \exp[1 - (a - Z_0)/b]$.

Из приведенного анализа С. Н. Свалов делает вывод, что максимальная земельная рента наблюдается в возрасте экономической (согласно Н. А. Моисееву) спелости. Он же вычислил соотношение между T_s и T_ϕ : $T_s = T_\phi \exp[1 + (e^{-ET} - 1)/ET_\phi]$. Так, если $E = 0,03$, то при T_ϕ соответственно в 40, 60, 80 лет T_s будет равна 61, 103, 149 лет.

Методика Н. А. Моисеева в России принята на федеральном уровне [23].

В противовес Н. А. Моисееву А. Д. Янушко [7] считает, что экономическая спелость леса должна определяться тем возрастом, когда наблюдается максимум рентабельности выращивания древостоя:

$$P_a = \frac{GW + D - C}{C} 100, \quad (4)$$

где P_a – рентабельность лесовыращивания в возрасте «а»; G – качественная цифра древостоя в возрасте «а»; W – древесный запас, м³; D – доход от других видов пользования; C – себестоимость лесовыращивания.

По мнению А. Д. Янушко, произведение $G \cdot W$ выступает в качестве древесной продукции лесохозяйственного производства. Оно включает только ту часть биомассы дерева, которая в настоящее время имеет потребительную стоимость и находит сбыт. А. Д. Янушко допускает, что величина D может не учитываться.

А. Д. Янушко считает, что рентабельность лесовыращивания определяется из расчета таксовой стоимости леса на корню. Ранее отмечено, что по методике М. А. Моисеева в расчет принимается заготовленная лесопродукция. По нашему мнению, именно в этом заключается главное отличие в подходах названных ученых, так как имея сведения о себестоимости лесовыращивания и величине стоимости древесины, что требуется знать, применяя оба метода, достаточно просто провести вычисление прибыли в абсолютных величинах или узнать рентабельность, используя методику А. Д. Янушко.

Представляется, что разница в подходах вытекает из давней и до конца не оконченной дискуссии о том, что же является продукцией лесного хозяйства (в его древесной части), – лес на корню или готовые сортименты. Не вдаваясь в детали этой дискуссии, так как вопрос лежит вне сферы настоящего исследования, следует сказать, что последнее обобщение проблемы сделал Н. А. Моисеев [9]. Он выделяет несколько подходов в лесной экономике по вопросу продукции лесного хозяйства. Первое – «лесное угодие». Этот подход не получил распространения, так как не решались вопросы, кто будет принимать (покупать) такую продукцию и по какой цене.

Другая точка зрения состоит в том, что продукцией лесного хозяйства являются те ресурсы и услуги леса, которые признаны целями хозяйства. При этом существуют разные мнения, считать ли продукцией ресурс (и/или услугу) на корню или уже в заготовленном и реализованном виде.

Н. А. Моисеев отмечает, что вопрос о продукции надо рассматривать с двух позиций: процесса воспроизводства и общественного разделения труда. В рамках процесса воспроизводства лес является основным средством производства, и потому он и отдельные его возрастные этапы (классы) не могут рассматриваться в качестве конечной продукции как цели лесного хозяйства. При общественном разделении труда выполняемые работы и услуги для исполнителя являются продукцией, например, при контрактной форме проведения уходов за лесом и т. п. С позиции воспроизводства продукцией лесного хозяйства являются ресурсы и услуги, реализованные потребителю. В применении к лесу – это древесина в виде определенных сортиментов, нашедшая своего покупателя за цену, окупающую затраты на лесовыращивание, заготовку и транспортировку.

Но продажа древесины на корню связана с общественным разделением труда, когда лесозаготовки осуществляются не лесхозами, а лесопользователями как подрядчиками, поставляющими древесину различным отраслям народного хозяйства. Отсюда вытекает, что та древесина на корню, которая находит сбыт, является для лесного хозяйства его продукцией. Ее реализация происходит обычно на нижнем пределе компенсирующих затрат на лесовыращивание, т. е. по таксам. При реализации по верхнему пределу (на аукционах) лесовладелец получает и чистый доход, или ренту.

Таким образом, лесное хозяйство имеет целью воспроизводство ресурсов и услуг леса для удовлетворения в них народного хозяйства и населения. При этом продукция как предмет потребления выступает в рамках воспроизводства как изъятие из леса ресурсы, находящие сбыт на рынке. В рамках общественного разделения труда такой продукцией для лесного хозяйства выступает древесина на корню и другие ресурсы, находящиеся в местах их произрастания и имеющие сбыт. Оба вида продукции не противоречат друг другу, а связаны в общей технологической цепочке от выращивания ресурса до его переработки и потребления.

Первый род продукции лесного хозяйства связан с масштабом простого воспроизводства, обусловлен текущими затратами и имеет необходимые стоимостные показатели (таксовую стоимость) для оценки эффективности производства, включая себестоимость и рыночную цену реализации. Другой род продукции лесного хозяйства связан с расширенным воспроизводством, направлен на улучшение лесов как основных средств производства.

В настоящее время в Беларуси господствующей точкой зрения на экономическую спелость является методика А. Д. Янушко, а в России – Н. А. Моисеева.

До недавнего времени методика А. Д. Янушко в целом соответствовала условиям ведения лесного хозяйства в Республике Беларусь. В определенной мере она может применяться еще примерно до 2015 г. С 2015 г. предприятия Министерства лесного хозяйства прекратят отпуск древесины на корню по таксам. Вся древесина

должна отпускаться в заготовленном виде. При этом требуется отпускать продукцию с наибольшей добавленной стоимостью, что приводит к продаже не столько круглых сортиментов, сколько продукции после первичной переработки, т. е. после распиловки сортиментов.

Учитывая это обстоятельство, нами разработан новый подход к определению экономической спелости. За прототип принята методика Н. А. Моисеева, которая дополнена рядом элементов, соответствующих современным требованиям к продукции лесного хозяйства.

Народнохозяйственная эффективность лесовыращивания до получения конечной продукции, имеющей конкретную потребительную стоимость, будет включать помимо затрат на заготовку и вывозку также затраты на первичную обработку древесины, и эта продукция будет иметь соответственно более высокую стоимость.

В конечном итоге экономическая спелость леса выражается формулой

$$\Theta_a = \frac{\sum_{i=1}^n \Pi_{i\text{сорт}} M_i}{\sum_{i=1}^n C_i} \rightarrow \max, \quad (5)$$

где Θ_a – коэффициент эффективности лесовыращивания в возрасте «а»; $\Pi_{i\text{сорт}}$ – цена за 1 м³ i сортимента; M_i – запас сортиментов на 1 га; C_i – себестоимость, р.: $C_i = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$; C_1, C_2, C_3, C_4 – себестоимость лесовыращивания (C_1), заготовки (C_2), вывозки (C_3), первичной переработки (распиловки) древесины (C_4).

Для практического использования нами разработан алгоритм определения экономической спелости леса, который здесь опущен для сокращения. Возрасты экономической спелости, вычисленные по нашей методике, в сравнении с предложениями других авторов приведены в таблице.

Сопоставление различных видов экономической спелости

Порода	Класс бонитета	Возраст экономической спелости, лет		
		по методике Н. А. Моисеева	по методике А. Д. Янушко	по нашей методике
Нормальные древостой				
Сосна	II	110	120	140
Ель	I	110	120	140
Дуб	II	115	140	180
Модальные древостой				
Сосна	II	65	90	70
Ель	I	85	85	100
Дуб	II	85	120	110–120

Из таблицы видно, что нынешние возрасты рубки, установленные по технической спелости, близки к экономической спелости для модальных древостоев. Возраст экономической спелости сильно зависит от действующих такс и цен, особенно от соотношения цен на пиловочник и баланс. Но определяющий фактор – состояние и динамика продуктивности насаждений, о чем свидетельствуют значительные расхождения возрастов экономической спелости для нормальных и модальных насаждений. Более высокие возрасты экономической спелости по нашей методике (по сравнению с другими методами) как для нормальных, так и для модальных насаждений, объясняются

тем, что в ней в большей степени представлен межотраслевой (народнохозяйственный) аспект экономической эффективности лесопользования, учитывающий не только стадию лесовыращивания, но и заготовку и первичную переработку древесного сырья, что особенно важно в условиях несовершенного ценообразования на продукцию лесного хозяйства.

Заключение

На основании изложенного приходим к выводу, что предложенные нами возрасты экономической спелости соответствуют современным требованиям к ведению лесного хозяйства и обеспечивают наивысшую рентабельность лесовыращивания. При этом потребуются повышение возрастов рубки в лесах II группы. Это мероприятие возможно осуществить в течение ближайших 20–30 лет в силу того, что в возрастной структуре лесов Беларуси преобладают средневозрастные насаждения, и расчетная лесосека в данном случае не будет уменьшаться.

Литература

1. Багинский, В. Ф. Лесопользование в Беларуси / В. Ф. Багинский, Л. Д. Есимчик. – Минск : Беларус. навука, 1996. – 367 с.
2. Ермаков, В. Е. Лесоустройство / В. Е. Ермаков. – Минск : Выш. шк., 1993. – 259 с.
3. Орлов, М. М. Лесоустройство / М. М. Орлов. – Л. : Гостехиздат, 1927. – Т. 1. – 428 с.
4. Орлов, М. М. Лесоустройство / М. М. Орлов. – Л. : Лесное хоз-во и лесная промышленность, 1928. – Т. 2. – 326 с.
5. Костюкович, Ф. Т. Вопросы экономики и планирования лесохозяйственного производства / Ф. Т. Костюкович. – Минск : Госиздат БССР, 1969. – 205 с.
6. Судачков, Е. Я. Спелость леса / Е. Я. Судачков. – Л. : Гослесбумиздат, 1957. – 52 с.
7. Янушко, А. Д. Экономическая спелость и оборот рубки в эксплуатационных лесах / А. Д. Янушко // Лесное и охотничье хоз-во. – 2000. – № 2. – С. 8–11.
8. Янушко, А. Д. Лесное хозяйство Беларуси / А. Д. Янушко. – Минск : БГТУ. – 2001. – 218 с.
9. Моисеев, Н. А. Экономика лесного хозяйства / Н. А. Моисеев. – М. : МГУЛ, 1999. – Ч. 1. – 158 с.
10. Багинский, В. Ф. Системный анализ в лесном хозяйстве : учеб. пособие / В. Ф. Багинский. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. – 168 с.
11. Переход, В. И. Из истории лесного хозяйства Белоруссии / В. И. Переход // Сб. науч. работ по лесному хоз-ву. – Минск : АН БССР, 1956. – Вып. 7. – С. 15–40.
12. Рудзский, А. Ф. Руководство к устройству русских лесов / А. Ф. Рудзский. – СПб. : Лесной ин-т, 1899. – 118 с.
13. Трубников, М. М. Экономическая спелость леса и организация лесохозяйственного производства / М. М. Трубников. – М. : Лесная промышленность, 1969. – 175 с.
14. Свалов, С. Н. Аналитический метод расчета возрастов стоимостных спелостей / С. Н. Свалов // Многоцелевое лесопользование : сб. науч. тр. ВНИИЛМ. – М., 1992. – С. 43–47.
15. Бобруйко, Б. И. Экономическая оценка лесных ресурсов: роль возрастных коэффициентов ценности насаждений / Б. И. Бобруйко, С. К. Пентелькин, В. А. Китаров // Лесное хоз-во. – 1989. – № 12. – С. 17–19.

16. Уиллиамс, М. Р. В. Рациональное использование лесных ресурсов / М. Р. В. Уиллиамс. – М. : Экология, 1991. – 125 с.
17. Моисеев, Н. А. Определение возраста спелости для одно- и многоресурсного лесосоуправления / Н. А. Моисеев, В. С. Чуенков // Лесное хоз-во. – 1997. – № 5. – С. 50–52.
18. Атрощенко, О. А. Методы определения экономической спелости в нашей стране и за рубежом / О. А. Атрощенко, А. Д. Янушко // Лесоведение и лесное хозяйство : республик. межведомств. сб. науч. тр. – Минск : БТИ, 1988. – Вып. 23. – С. 98–103.
19. Plochmann, R. Forest polity challenges in formatting management quidlines in Central Europe / R. Plochmann // XIX World Congress Proceedings. – Montreal, 1990, Division 4. – P. 150–158.
20. Speidel, G. Aufsätze zur Forstlichen Betrieb-swirtschaftslehre 1949–1985 / G. Speidel // Schriften des institute fur Forsteinrichtung und Forstliche Betriebswirtschaft. – Freiburg : Herausgeben von G. Oesten, 1994. – S. 36–77.
21. Kilkki, P. Timber management planning / P. Kilkki. – Joensuu, 1985. – 159 p.
22. Моисеенко, Ф. П. О закономерностях в росте, строении и товарности насаждений // Доклад, обобщающий содержание опубликованных работ, на соискание ученой степени д-ра с.-х. наук. – К. : УСХА, 1965. – 78 с.
23. Верхунов, П. М. Методика установления спелости насаждений и обоснование возрастов рубок главного пользования в лесах различного целевого назначения России / П. М. Верхунов, И. П. Курненкова, В. В. Загреев. – Йошкар-Ола : Федер. служба лесного хоз-ва Рос. Федерации, 2000. – 45 с.
24. Волков, В. Д. Спелость леса и оборот рубки / В. Д. Волков // Лесное хоз-во. – 1987. – № 3. – С. 46–49.

Получено 19.09.2013 г.

УДК 339.13:631.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВС- И XYZ-АНАЛИЗА ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ ПРОДАЖАМИ

П. В. ТИЛИЧЕНКО, С. С. ДРОЗД

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

За более чем сто лет идея, которая была сформулирована двумя выдающимися учеными Фрэнсисом Уолкером и Генри Джорджем, дала жизнь серьезному математическому аппарату, нашла воплощение и практические применение в тысячах отраслевых приложений.

До настоящего времени аналитики всего мира используют этот практический инструмент. Данный метод анализа получил большое развитие благодаря своей универсальности и эффективности. АВС-анализ – это один из инструментов для определения ключевых товаров, категорий, брендов компании. Основан на правиле Парето – 20 % товаров (единиц) приносят компании 80 % прибыли (оборота) [1]. Этот принцип, как и многие другие, может быть применен не только к товарам. Объектом анализа могут выступать клиент, поставщик, географическое направление деятельности, человеческие ресурсы [2]. Для примера мы будем рассматривать именно товар.

Цель исследования – определить направления использования АВС- и XYZ-анализа при планировании производства и продаж сельскохозяйственной техники.

В соответствии с указанной целью поставлены и решены следующие задачи:

- провести АВС-анализ продаж сельскохозяйственной техники и дать оценку;
- провести XYZ-анализ продаж сельскохозяйственной техники и дать оценку;
- совместить АВС- и XYZ-анализ для наиболее оперативного принятия решений

в управлении продажами.

Методика проведения АВС-анализа

Сформируем отчет о продажах сельскохозяйственной техники ПО «Гомсельмаш» за 3 квартал 2011 г. Отсортируем данные по мере убывания продаж, выведем общую сумму и получим табл. 1 в следующем виде:

Таблица 1

Исходные данные о продажах товара за 3 квартал 2011 г.

№ п/п	Наименование техники	Объем продаж, шт.			
		Июль 2011 г.	Август 2011 г.	Сентябрь 2011 г.	3 квартал 2011 г.
	<i>Итого</i>	174	189	172	535
1	КЗС-1218	96	75	70	241
2	КЗС-812	47	67	19	133
7	КСК-600	1	2	17	20
3	КЗС-7	0	33	14	47
4	К-Г-6 (УЭС-2-280)	10	1	25	36
8	КДП-3000	8	10	25	43
5	К-Г-6 (УЭС-280)	9	0	0	9
6	КВК-800	3	1	2	6

Затем определяем группы А, В и С. Для этого необходимо:

1. Рассчитать доли продаж по каждому виду техники в общем обороте.
2. Рассчитать эти доли с накопительным итогом.
3. Присвоить значения групп по каждому виду техники.

Расставив границы ABC-классов, получаем табл. 2 в следующем виде:

Таблица 2

Проведение ABC-анализа по данным о продажах товара за квартал

№ п/п	Наименование техники	3 квартал 2011 года, шт.	Доля в обороте, %	Доля в обороте с накопительным итогом, %	Группа
<i>Итого</i>		535	100,0	100,0	
1	КЗС-1218	241	45,0	45,0	А
2	КЗС-812	133	24,9	69,9	В
7	КСК-600	20	3,7	73,6	В
3	КЗС-7	47	8,8	82,4	С
4	К-Г-6 (УЭС-2-280)	36	6,7	89,2	С
8	КДП-3000	43	8,0	97,2	С
5	К-Г-6 (УЭС-280)	9	1,7	98,9	С
6	КВК-800	6	1,1	100,0	С

Распределение, которое мы использовали, взято исходя из практики продаж сельскохозяйственной техники за последние годы:

- Группа А – объемы продаж, сумма долей с накопительным итогом которых составляет первые 50 % от общей суммы оборота.

- Группа В – следующие за группой А объемы продаж, сумма долей с накопительным итогом которых составляет от 50 до 80 % от общей суммы оборота.

- Группа С – оставшиеся объемы продаж, сумма долей с накопительным итогом которых составляет от 80 до 100 % от общей суммы оборота.

Результатом ABC-анализа будет итоговая табл. 3 в следующем виде:

Таблица 3

Результат ABC-анализа

Наименование группы	Объем продаж, шт.	Доля продаж, %	Количество наимено- ваний техники, ед.	Доля в номенк- латуре, %
Группа А	241	45,0	1	12,5
Группа В	153	28,6	2	25,0
Группа С	141	26,4	5	62,5
<i>Итого</i>	535	100,0	8	100,0

Подведем итоги:

- Класс А – товары, приносящие наибольшую прибыль нашему предприятию, несмотря на то, что доля от общего количества номенклатуры составляет всего 12,5 %. Указанная группа товаров требует к себе наиболее пристального внимания.

- Класс В – также приносит немалую прибыль предприятию. Забывать о них не стоит, а может некоторые товары получится развить до класса А.

- Класс С – потенциальные товары «на вылет» из ассортимента. Некоторые из них неоправданно занимают большую часть места на складе, являются причиной замораживания активов предприятия, трат человеческих или транспортных ресурсов.

Однако не стоит спешить выводить из ассортимента класс С. Эти товары могут приносить небольшую прибыль, но иметь высокую и стабильную оборачиваемость. Если мы уберем из производства данный товар, можем лишиться значительного количества покупателей. Хороший тому пример – хлеб. Он стоит недорого и наценка на него невелика, но обороты стабильные и весомые. Что будет, если в нашем магазине не станет хлеба? Человек, который пришел за ним, не купит вслед колбасу, масло или что-то еще, а пойдет за этим всем в соседний магазин.

Для того чтобы выявить подобный товар, и не только его, ABC-анализа недостаточно. Следующий вид анализа, который мы рассмотрим, – XYZ.

Методика проведения XYZ-анализа

Основная идея XYZ-анализа состоит в группировании объектов по однородности анализируемых параметров, другими словами – по коэффициенту вариации [3].

В качестве объектов анализа можно выбрать товар, товарную группу, поставщика и т. п. Затем необходимо определить параметр, по которому будет проводиться анализ. Как правило, анализ проводится по продажам товара или по отгрузке комплектов со склада. Выбор единиц измерения при проведении данного анализа не имеет принципиального значения.

Затем рассчитываем коэффициент вариации по каждому товару. Для этого удобно использовать любой табличный редактор. В MS Excel в разделе «статистические функции» есть функция «СТАНДОТКЛОНП» (диапазон ячеек), позволяющая вычислять среднее квадратическое отклонение по выбранному диапазону. Полная формула, которую необходимо ввести в ячейку для расчета коэффициента вариации, будет выглядеть так [4]:

$$= \text{СТАНДОТКЛОНП} (\text{диапазон ячеек}) / \text{СРЗНАЧ} (\text{диапазон ячеек}).$$

Следующий шаг – это группирование товаров по величине коэффициента вариации.

В группу X попадают товары с коэффициентом вариации менее 50 %.

В группу Y – товары с коэффициентом вариации от 50 до 100 %.

В группу Z – товары с коэффициентом вариации более 100 %.

Пример определения групп товаров при проведении XYZ-анализа представлен в табл. 4.

Таблица 4

Проведение XYZ-анализа по данным о продажах товара за квартал

№ п/п	Наименование техники	Объем продаж за июль	Объем продаж за август	Объем продаж за сентябрь	Итого за 3 квартал	Среднее значение	Значение подкоренного выражения	Коэффициент относительной вариации, %	По сколькум периодам проводился расчет	XYZ-группа
1	КЗС-1218	96	75	70	241	80	126,8888889	14	3	X
6	КВК-800	3	1	2	6	2	0,666666667	41	3	X
2	КЗС-812	47	67	19	133	44	387,5555556	44	3	X
8	КДП-3000	8	10	25	43	14	57,55555556	53	3	Y
4	К-Г-6 (УЭС-2-280)	10	1	25	36	12	98	82	3	Y
3	КЗС-7	0	33	14	47	16	182,8888889	86	3	Y
7	КСК-600	1	2	17	20	7	53,55555556	110	3	Z
5	К-Г-6 (УЭС-280)	9	0	0	9	3	18	141	3	Z

Результаты XYZ-анализа приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты XYZ-анализа

Наименование группы	Объем продаж, шт.	Доля продаж, %	Количество наименований техники, ед.	Доля в номенклатуре, %
Группа А	380	71,0	3	37,5
Группа В	126	23,6	3	37,5
Группа С	29	5,4	2	25,0
Итого	535	100,0	8	100,0

Подведем итоги:

- Класс Х – товар меньше всего подвержен колебаниям спроса, продажи легко прогнозируемы, количество, которое всегда должно присутствовать в ассортименте, легко вычислить.

- Класс Y – средняя прогнозируемость продаж.

- Класс Z – продажи/спрос товара не поддается прогнозу. По данному классу необходимо задуматься, так как, возможно, с частью этого товара стоит начать работать под заказ. Еще часть вообще стоит вывести из ассортимента. Есть вероятность, что при этом потеряем в широте ассортимента товара, но приобретем больше от размораживания активов и сокращения расходов.

Таким образом, применение XYZ-анализа позволяет разделить весь ассортимент на группы в зависимости от стабильности продаж. По полученным результатам целесообразно провести работу по выявлению и устранению основных причин, влияющих на стабильность и прогнозируемость продаж [5].

Более полную картину об ассортименте предприятия мы получим, если совместим данные ABC и XYZ-анализов.

Методика совмещения анализов

Сначала XYZ-анализ приводим в необходимый для совмещения вид (табл. 6).

Таблица 6

XYZ-анализ (приведенный для совмещения)

№ п/п	Наименование техники	Объем продаж за июль	Объем продаж за август	Объем продаж за сентябрь	Итого за 3 квартал	Среднее значение	Значение подкоренного выражения	Коэффициент относительной вариации	По скольким периодам проводился расчет	XYZ-группа
1	КЗС-1218	96	75	70	241	80	126,8888889	14	3	X
2	КЗС-812	47	67	19	133	44	387,5555556	44	3	X
3	КЗС-7	0	33	14	47	16	182,8888889	86	3	Y
4	К-Г-6 (УЭС-2-280)	10	1	25	36	12	98	82	3	Y
5	К-Г-6 (УЭС-280)	9	0	0	9	3	18	141	3	Z
6	КВК-800	3	1	2	6	2	0,666666667	41	3	X
7	КСК-600	1	2	17	20	7	53,55555556	110	3	Z
8	КДП-3000	8	10	25	43	14	57,55555556	53	3	Y

После этого результаты анализов совмещаются. Наиболее простой вариант совмещения – это отсортировать в MS Excel оба файла с результатами анализа по индексному полю, затем скопировать столбец с группами из одного файла в другой. Лучше – из XYZ в ABC, так как фактическое значение доли оборота объекта имеет больше практического смысла, чем коэффициент вариации.

Далее соединяем значения в одной ячейке, для этого воспользуемся формулой =СЦЕПИТЬ(I3;J3) и получим в результате (табл. 7):

Таблица 7

ABC-совмещение

№ п/п	Наименование техники	Объем продаж за июль	Объем продаж за август	Объем продаж за сентябрь	Итого за 3 квартал	Доля в обороте, %	Доля в обороте с накопительным итогом, %	Группа	XYZ-группа	Совмещение
1	КЗС-1218	96	75	70	241	49,3	49,3	А	Х	АХ
2	КЗС-812	47	67	19	133	21,1	70,4	В	Х	ВХ
3	КЗС-7	0	33	14	47	6,6	84,7	С	У	СУ
4	К-Г-6 (УЭС-2-280)	10	1	25	36	6,6	91,3	С	У	СУ
5	К-Г-6 (УЭС-280)	9	0	0	9	1,5	98,9	С	З	СЗ
6	КВК-800	3	1	2	6	1,1	100,0	С	Х	СХ
7	КСК-600	1	2	17	20	7,7	78,1	В	З	ВЗ
8	КДП-3000	8	10	25	43	6,0	97,3	С	У	СУ

Таблица 8

Результаты совмещения анализов

№ п/п	Наименование техники	Объем продаж за июль	Объем продаж за август	Объем продаж за сентябрь	Итого за 3 квартал	Доля в обороте, %	Доля в обороте с накопительным итогом, %	Совмещение
1	КЗС-1218	96	75	70	241	49,3	49,3	АХ
2	КЗС-812	47	67	19	133	21,1	70,4	ВХ
7	КСК-600	1	2	17	20	7,7	78,1	ВЗ
6	КВК-800	3	1	2	6	1,1	100,0	СХ
3	КЗС-7	0	33	14	47	6,6	84,7	СУ
4	К-Г-6 (УЭС-2-280)	10	1	25	36	6,6	91,3	СУ
8	КДП-3000	8	10	25	43	6,0	97,3	СУ
5	К-Г-6 (УЭС-280)	9	0	0	9	1,5	98,9	СЗ

В результате совмещения (табл. 8) получилось шесть групп товаров.

Товары групп А и В обеспечивают основной товарооборот предприятия. Товары группы АХ (КЗС-1218) и ВХ (КЗС-812) отличает высокий товарооборот и стабильность. Необходимо обеспечить постоянное наличие товара, но для этого не нужно создавать избыточный страховой запас. Расход товаров этой группы стабилен и хорошо прогнозируется.

Товары группы BZ (КСК-600) при высоком товарообороте отличаются низкой прогнозируемостью расхода. Попытка обеспечить гарантированное наличие по всем товарам данной группы только за счет избыточного страхового товарного запаса приведет к тому, что средний товарный запас предприятия значительно увеличится. По товарам данной группы следует пересмотреть систему заказов. Часть товаров нужно перевести на систему заказов с постоянной суммой (объемом) заказа, по части товаров необходимо обеспечить более частые поставки, выбрать поставщиков, расположенных близко к складу (и снизить тем самым сумму страхового товарного запаса), повысить периодичность контроля, поручить работу с данной группой товаров самому опытному менеджеру по продажам на предприятии и т. п.

Товары группы С составляют до 62,5 % ассортимента предприятия. Применение XYZ-анализа позволяет сильно сократить время, которое менеджер тратит на управление и контроль над товарами данной группы.

По товарам группы СХ (КВК-800) можно использовать систему заказов с постоянной периодичностью и снизить страховой товарный запас.

По товарам группы СУ (КЗС-7, К-Г-6 (УЭС-2-280), КДП-3000) можно перейти на систему с постоянной суммой (объемом) заказа, но при этом формировать страховой запас, исходя из имеющихся у предприятия финансовых возможностей.

В группу товаров CZ (К-Г-6 (УЭС-280)) попали товары спонтанного спроса, поставляемые под заказ и т. п. Часть этих товаров можно безболезненно выводить из ассортимента, а другую часть нужно регулярно контролировать, так как именно из товаров этой группы возникают неликвидные или труднореализуемые товарные запасы, от которых предприятие несет потери. Выводить из ассортимента необходимо остатки.

Заключение

Таким образом, совмещение ABC- и XYZ-анализа может быть использовано не только как инструмент управления продажами, но и как объект стратегического анализа, результаты которого могут во многом помочь в принятии решений по стратегическому развитию предприятия.

Использование совмещенного ABC- и XYZ-анализа позволит:

- повысить эффективность системы управления продажами;
- повысить долю высокоприбыльных товаров без нарушения принципов ассортиментной политики;
- выявить ключевые товары и причины, влияющие на количество товаров, хранящихся на складе;
- перераспределить усилия персонала в зависимости от квалификации и имеющегося опыта.

Литература

1. Григорьев, М. Н. Маркетинг : учеб. пособие для вузов / М. Н. Григорьев. – М. : Гардарики, 2006. – 366 с.
2. Маркетинг : учеб. для студентов вузов / под ред. Г. А. Васильева. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 208 с.
3. Модели и методы логистики : учеб. пособие / под ред. В. С. Лукинского. – СПб. : Питер, 2003. – 121 с.
4. Алесинская, Т. В. Основы логистики. Функциональные области логистического управления / Т. В. Алесинская. – Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 79 с.
5. Афанасьев, С. В. Метод треугольника в ABC-анализе / С. В. Афанасьев // Маркетинг в России и за рубежом. – 2007. – № 2. – С. 5–9.

Получено 03.10.2013 г.

УДК 621.833.001.24

Рогачевский Н. И. Измерительное межосевое расстояние эвольвентных колес с несимметричным профилем зубьев

Показана целесообразность применения зубчатых передач с несимметричным профилем зубьев. Приведен анализ методов и средств контроля взаимного положения разноименных боковых поверхностей зубьев с симметричным и несимметричным профилем. Разработана методика расчета предельных размеров измерительного межосевого расстояния, служащих для контроля взаимного положения разноименных боковых поверхностей зубьев с несимметричным эвольвентным профилем, позволяющих обеспечить техническую документацию производства зубчатых колес с такими зубьями научно обоснованными контрольными параметрами.

Rogachevski N. I. Measuring Distance Between Axes of Involute Gears with Asymmetrical Tooth Profile

Advisability of applying toothed gears with asymmetrical gear teeth profile is shown. The analysis of the methods and means of controlling relative position of contralateral side surfaces of the teeth with symmetrical and asymmetrical profile is presented. The methods of calculating limiting measuring distance between axes used to control relative positions of contralateral side surfaces of the teeth with asymmetrical involute profile are developed enabling to provide technical documentation for manufacturing tooth gears with such teeth using scientifically justified reference parameters.

УДК 660.046.4:669.187.2

Ровин Л. Е., Ровин С. Л. Ресурсосбережение при электроплавке

Представлен аналитический обзор способов и устройств предварительного подогрева шихты при электроплавке стали и чугуна как одного из способов интенсификации и ресурсосбережения в металлургии и литейном производстве.

Высокотемпературный подогрев обеспечивает снижение удельных затрат электроэнергии на 150–200 кВт/т. Приведены данные о целесообразности применения природного газа при определенном соотношении цен на энергоносители.

Даны рекомендации по выбору оптимальных технических решений, в том числе комплексных плавильных агрегатов.

Rovin L. E., Rovin S. L. Resource Saving During Electrosmelting

Analytical review of the methods and devices of charge pre-heating during steel and iron smelting is presented as one of the methods of intensification and resource saving in metallurgy and foundry engineering.

High temperature pre-heating provides for the reduction of specific electric energy consumption by 150–200 kW/t. The data on practicability of applying natural gas at a specified price ratio for energy resources are presented.

Recommendations on the selection of optimum engineering solutions are presented including also those for complex melting units.

УДК 624.131.5

Прокопенко Д. В. Математическое и компьютерное моделирование несущей способности одиночной винтовой сваи с учетом уплотнения грунта

Рассмотрена несущая способность грунтового основания винтовой сваи с учетом уплотнения грунта вокруг ствола сваи. Решение поставленной задачи было получено двумя способами: путем формирования однородного грунтового основания, эквивалентного по несущей способности реальному неоднородно уплотненному грунтовому основанию, и неоднородно-уплотненного грунтового основания с изменяющимся модулем

деформации. Исследование деформационного процесса указанной системы проводилось с помощью программного комплекса «Энергия – ОС».

Prokopenko D. V. Mathematical and Computer Simulation of Carrying Capacity of a Single Screw Pile Subject to Ground Compaction

Carrying capacity of ground base of the screw pile subject to compaction of the ground base around pile body is considered. The solution of the problem assigned was found in two ways: by forming the homogeneous ground base, equivalent by carrying capacity to the real inhomogeneously compacted ground base and also forming inhomogeneously compacted ground base with variable modulus of deformation. The study of deformation process of the system mentioned was carried out with the use of software complex “Energy OS”.

УДК 539.375

Тариков Г. П., Комраков В. В., Пархоменко В. Н., Бельский А. Т. Об одном методе определения предельного состояния элементов конструкций с повреждениями

Рассматривается новый метод определения предельного состояния элементов конструкции с повреждениями, основанный на совместном использовании критериев прочности материала механики сплошной среды и механики разрушения. Подробно рассмотрена методика решения задач по определению предельного состояния элементов конструкций, имеющих концентраторы напряжений в виде коррозионных повреждений и трещин. Приведен числовой пример решения конкретной задачи при наличии повреждения в виде коррозии с трещиной. Сделан вывод о возможности применения метода при решении различных задач инженерной практики.

Tarikov G. P., Komrakov V. V., Parkhomenko V. N. On One of the Methods of Determining Limiting State of the Elements of Damaged Structure

The novel method of determining limiting state of the elements of structure with damages based on the combined use of the criteria of material durability of continuum mechanics and fracture mechanics. The methods of solution of the problems of determining limiting state of the structures having stress concentrators in the form of factures and corrosion damages are considered in detail. A numerical example of the solution of certain problem in the case with damage in the form of corrosion and fracture is presented. The conclusion is made about possible use the method for the solution of different problems of engineering practice.

УДК 621.121

Коробко И. В., Коваленко В. А. Особенности оптимизации формы чувствительных элементов вихревых измерительных преобразователей расхода жидкофазной среды

Представлены результаты исследования влияния формы тел обтекания вихревого измерительного преобразователя расхода жидкофазной среды на метрологические характеристики прибора. Проведено численное компьютерное моделирование взаимодействия жидкостного потока с чувствительными элементами преобразователя расхода, получено графическое распределение векторов скорости потока по оси завихрения для тел обтекания в форме цилиндра, параллелепипеда, треугольной призмы, трапеции и осуществлен анализ устойчивости вихреобразования в зависимости от формы тела обтекания.

Korobko I. V., Kovalenko V. A. Specific Features of Optimization of the Shape of Sensing Elements of Vortex Metering Transducers for Metering Flow Rate of Liquid Phase Agent

The results of the study of the influence of the shape of the sensing element of vortex liquid phase flow rate meter on metrological characteristics of the instrument are presented. Numerical computer modeling of interaction of the liquid flow with sensing elements of the flow meter is carried out, graphic distribution of flow velocity vectors over the vortex axis is ob-

tained for sensing elements having the shape of a cylinder, a parallelepiped, a triangular prism and a trapezoid. The analysis of vortex formation resistance subject to the shape of the sensing element is provided.

УДК 621.89

Тариков Г. П., Пархоменко В. Н. К решению контактной задачи термоупругости применительно к зубчатой передаче

Рассмотрена актуальная термоупругая задача о контакте зубьев (шестерни и колеса) с криволинейными образующими боковых поверхностей с начальным контактом в точке.

Пространственная задача термоупругости в перемещениях была сведена к решению дифференциального уравнения равновесия. Для его решения было применено представление Папковича–Нейбера, в котором вектор перемещений выражается через гармонический вектор и гармонический скаляр. В соответствии с гипотезой Герца, контактирующие тела, при определении напряженного состояния, заменены упругими полупространствами, прижатыми друг к другу по площадке контакта. Поэтому вначале было найдено решение краевой задачи термоупругости для полупространства. Далее выведено интегральное уравнение контактной задачи термоупругости применительно к зубчатой передаче с точечным контактом.

Получено двумерное интегральное уравнение контактной задачи термоупругости первого рода, решение которого позволит исследовать влияние температуры зубьев на распределение контактных давлений по эллиптической площадке контакта и определить величины полуосей контактного эллипса.

Tarikov G. P., Parkhomenko V. N. On the Solution of Gear Transmission Contact Problem of Thermoelasticity

Actual thermoelasticity problem of the contact of teeth (a pinion gear and a gear wheel) with curvilinear generating lines of lateral surfaces with initial contact at a point is considered.

Three-dimensional displacement thermoelasticity problem was reduced to the solution of differential equilibrium equation. Representation of Papkovich - Neuber was applied to solve this equation in which displacement vector is represented through harmonic vector and harmonic scalar. In accordance with Hertz hypothesis contacting bodies when a stressed state is determined are replaced with elastic half-spaces pressed to each other along the contact area. That is why first the solution for boundary value problem of thermoelasticity for half space was found. Then an integral equation of Hertzian problem of elasticity was derived in respect to gear transmission with point contact.

Two-dimension integral equation of Hertzian problem of thermoelasticity of the first kind is obtained solving of which enables to study the influence of the tooth temperature on contact pressure distribution on the elliptical contact area and to determine the values of semi-axes of contact ellipse.

УДК 631.35

Рехлицкий О. В., Чупрынин Ю. В. Рациональное распределение массы по опорам самоходного кормоуборочного комбайна

Обоснована необходимость правильного выбора конструкционной схемы мобильной кормоуборочной машины для обеспечения рационального распределения массы по опорам. Представлена математическая модель для определения реакций на опорах мобильной кормоуборочной машины по трехточечной схеме с шарниром качания управляемого моста. Описаны критерии оценки и способы достижения заданных параметров поперечной, продольной устойчивости и управляемости машины. Представлено математическое описание для оценки предельных тяговых свойств по критерию сцепления с опорной поверхностью. Использование данной методики позволяет рационально подобрать распределение массы по опорам на этапе проектирования машины для обеспечения

удовлетворительных мобильных свойств во всех возможных состояниях с учетом всего шлейфа адаптеров.

Rekhlitski O. V., Chuprynin Y. V. Efficient Mass Distribution on the Supports of Mobile Harvesting Machine

The necessity of correct selection of structural diagram of the mobile harvesting machine for providing efficient distribution of the mass on the supports is substantiated. A mathematical model for determining the response on the supports of the mobile harvesting machine according to three point pattern with pivot of steering axle is presented. Criteria for evaluating and the methods of providing preset parameters of lateral and longitudinal stability and steerability of the unit are described. Mathematical formulation for the evaluation of limit traction characteristics by the criterion of bearing area adhesion is presented. The use of these methods enables to efficiently select mass distribution on the supports during designing of the unit for providing adequate mobile characteristics in all possible conditions allowing for the whole chain of adapters.

УДК 631.3-52:631.3.072.2

Попов В. Б. Влияние параметров механизма навески и плуга на тягово-энергетические показатели пахотного агрегата

Получены аналитические выражения для определения мгновенного центра вращения навесной машины и общего тягового сопротивления со стороны плуга в функциональной зависимости от параметров механизма навески и плуга в режиме работы пахотного агрегата. На основе расчета вышеупомянутых выходных параметров пахотного агрегата в составе универсального энергетического средства и плуга уточнены зависимости для расчета перераспределения нагрузки на передний и задний мосты УЭС.

Popov V. B. The Influence of the Parameters of Linkage Mechanism and a Plough on Tractive-Energy Characteristics of the Ploughing Unit

Analytical expressions are obtained for defining instantaneous center of a mounted machine and total plough tractive resistance with functional dependence on the parameters of the linkage mechanism and the plough in operating mode of ploughing unit. Based on the analysis of the above mentioned parameters of the ploughing unit being the part of multipurpose power unit and of the plough the dependencies for calculating redistribution of the load on the front and the rear axles of multipurpose power unit are defined more exactly.

УДК 533.9.01

Варданян Р. С., Медведицков С. И. Отражение лучистой энергии от нестационарной стохастической среды

Рассмотрена нестационарная задача диффузного отражения излучения от случайно-неоднородной (стохастической) среды. Учитывается время, затраченное квантом в пути, а также время нахождения атома в возбужденном состоянии. Предполагается, что в среде происходят флуктуации электронной концентрации, температуры электронной подсистемы. В этом случае вероятность переизлучения поглощенного фотона является случайной величиной в каждой точке среды, т. е. является случайным полем. Математически целесообразно считать, что вероятность переизлучения фотона в элементарном акте рассеяния является регулярной функцией от некоторого параметра u , который является случайным полем. В частности, рассматривается случай, когда u является гауссовским полем. При сделанных предположениях методом сложения слоев получено замкнутое уравнение относительно условной вероятности отражения излучения от среды при условии, что на границе среды параметр u принимает данное значение. Установлено общее правило учета флуктуаций вероятности переизлучения кванта при составлении уравнения относительно условной вероятности отражения.

Vardanyan R. S., Medveditskov S. I. Reflection of Radiant Energy from Nonstationary Stochastic Medium

Nonstationary problem of diffuse reflection of emission from randomly inhomogeneous (stochastic) medium is considered. The time periods of quantum being on the way and being in excited state are also taken into account. It is assumed that fluctuation of electronic concentration and the temperature of electronic sub-system occur in medium. In this case probability of re-emission of absorbed photon is a random value in every point of medium, i. e. it is a random field. It is mathematically advisable to consider that probability of photon re-emission in elementary scattering act is a regular function of some parameter u which is the random field. Particularly the case is considered when u is Gaussian field. After making an assumption and using the method of layer addition a closed equation in conditional probability of reflection of emission from medium is obtained, with the assumption that parameter u on the medium boundary takes on a given value. The general rule is established of taking into account fluctuations of the probability of quantum re-emission during equating in conditional probability of reflection.

УДК 697.34

Петраш В. Д., Чернышева И. В. Зависимость эффективности преобразования энергетических потоков от удельного расхода воздуха в системе стабилизирующего охлаждения вращающейся печи для промышленного теплоснабжения

Для предложенной системы теплоснабжения на основе термотрансформированной энергии охлаждения печи и низкопотенциальных источников получена новая зависимость оценки эффективности преобразования интегрируемых потоков. Установлено, что увеличение расхода газоздушного потока на единицу нагреваемой среды при отборе теплоты с охлаждаемой поверхности печи приводит к росту температуры греющей среды перед испарителем и значительному возрастанию коэффициента преобразования.

Petrasch V. D., Chernyshova I. V. The Dependence of Energy Flow Transformation on Specific Air Consumption in the System of Stabilizing Cooling of the Rotary Kiln for Industrial Heating

A new dependence of evaluating integrated flow transformation efficiency is obtained for the proposed heating system based on thermotransformed energy of the kiln cooling and low potential sources. It is established that increasing consumption of air-gas flow per the unit of heated medium during heat removal from the cooled surface of the kiln results in increase of heating medium temperature before the evaporator and considerable increase of transformation coefficient.

УДК 621.311

Грунтович Н. В., Шенец Е. Л., Жеранов С. А. Оценка энергоэффективности модернизации производства листового стекла

С использованием кластерного анализа была выполнена структурная группировка суточных удельных расходов потребляемых топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на выпуск продукции технологических линий производства листового стекла. Построены структурные модели потребляемых удельных расходов ТЭР, выполнен анализ режимов работы технологических линий производства листового стекла за четырехлетний период и проведена оценка эффективности ввода в эксплуатацию новой технологической линии.

Gruntovich N. V., Shenets E. L., Zheranov S. A. Evaluation of Energy Efficiency of Plate Glass Manufacture Modernization

Using cluster analysis structural grouping the values of daily specific consumption of fuel-energy resources for manufacturing the products of plate glass production lines is performed. Structural models of specific fuel-energy resource consumption are built, the analysis of operating modes of plate glass production lines for the 4-year period is carried out and the evaluation of the efficiency of new production line putting into operation is performed.

УДК 621.311

Капанский А. А., Зализный Д. И. Автоматизация расчета теплового сопротивления кабеля

Разработана компьютерная программа, позволяющая автоматизировать процесс расчета тепловых сопротивлений элементов силового кабеля. Автоматизация расчета, учитывающая различные условия прокладки кабеля, позволит инженеру обоснованно производить выбор токоведущих частей кабеля как на стадии проектирования, так и при эксплуатации систем электроснабжения.

Capanski A. A., Zalizny D. I. Automation of Cable Thermal Resistance Computation

Software enabling to provide automation of the process of computing thermal resistance of power cable components is developed. Automation of computing allowing for different conditions of cable laying enables the engineer to reasonably provide selecting live parts of the cable at the stage of designing as well as during operation of electric power supply systems.

УДК 621.313.333

Грунтович Н. В., Петров И. В., Колесников П. М. Компьютерные системы технического диагностирования маслонаполненных трансформаторов

Статья посвящена перспективе перехода от стандартной системы технического обслуживания и ремонта согласно регламенту маслонаполненных трансформаторов к более современному методу ремонта на основе комплексного диагностирования с применением современных компьютерных систем. Рассмотрено создание на предприятиях Республики Беларусь экспертной системы как мероприятия по повышению надежности работы трансформаторов. Проведен анализ принципов построения и функциональных возможностей экспертных систем, используемых для диагностирования высоковольтных маслонаполненных трансформаторов.

Gruntovich N. V., Petrov I. V., Kolesnikov P. M. Computer Systems for Oil-Filled Transformer Technical Diagnosing

The paper deals with the prospects of transfer from conventional system of repair and maintenance according to the maintenance schedule for oil-filled transformers to up-to-date methods of repair based on complex diagnosing with the use of advanced computer systems. The formation of expert system at the enterprises of the Republic of Belarus as the measure on improving transformer operation reliability is considered. The analysis of the principles of formation and functional capabilities of expert systems applied for diagnosing high voltage oil-filled transformers is carried out.

УДК 338.439.02

Круглякова Г. В., Титоренко А. М. Продовольственная безопасность Республики Беларусь: состояние и проблемы обеспечения

Проведен углубленный анализ выполнения Концепции национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь. Показаны ее результаты по производству пищевой сельскохозяйственной продукции, продуктов питания, выявлен дисбаланс в потреблении населением основных продуктов питания по сравнению с научно обоснованными нормами. Выявлены проблемные направления в решении национальной продовольственной безопасности.

Krugliakova G. V., Titorenko A. M. Food Security in the Republic of Belarus : the Condition and Food Supply Problems

In-depth analysis of the implementation of the National Food Security Concept of the Republic of Belarus is performed. The data on food agricultural product and other food products output are shown. Imbalance in consuming main food products as compared with scientifically

based standards is shown. Challenging lines in the implementing national food security task are revealed.

УДК 630.906

Лапицкая О. В. Экономическая спелость леса в современных условиях

Показана история развития спелостей экономической природы за последние десятилетия. Установлено, что основным видом спелости, имеющей экономическую природу, является экономическая спелость леса. Приведены современные методы определения экономической спелости, используемые в России и в Беларуси. Разработан новый метод нахождения экономической спелости, учитывающий современные требования к ведению лесного хозяйства. Рассчитаны возрасты экономической спелости для главных древесных пород Беларуси.

Lapitskaya O. V. Economic Forest Maturity in the Present-Day Conditions

The history of the development of maturities of economic nature during the last decades is shown. It has been established that the major type of maturity having economic nature is economic maturity of the forest. A new method of defining economic maturity taking into consideration present-day forestry management requirements is developed. The age of economic maturity for the main wood species of Belarus is defined.

УДК 339.13:631.3

Тиличенко П. В., Дрозд С. С. Использование ABC- и XYZ-анализа для принятия решений в управлении продажами

Проведены ABC- и XYZ-анализ продаж сельскохозяйственной техники. Выделены три основные группы товаров: приносящие наибольшую прибыль предприятию, приносящие меньшую прибыль предприятию и потенциальные товары «на вылет» из ассортимента. Кроме того, весь ассортимент продукции предприятия разделен на группы в зависимости от стабильности продаж.

Предложено совмещение ABC- и XYZ-анализа для наиболее оперативного принятия решений в управлении продажами. Представленная методика анализа может быть использована не только как инструмент управления продажами, но и как объект стратегического анализа, результаты которого могут во многом помочь в принятии решений по стратегическому развитию предприятия: повысить эффективность системы управления продажами и долю высокоприбыльных товаров без нарушения принципов ассортиментной политики; выявить ключевые товары и причины, влияющие на количество товаров, хранящихся на складе; перераспределить усилия персонала в зависимости от квалификации и имеющегося опыта.

Tilitchenko P. V., Drozd S. S. The Use of ABC and XYZ Analyses for Decision Making in Sales Management

ABC and XYZ analyses of sales of agricultural machinery are carried out. Three major groups of the goods are defined: bringing the greatest profit, bringing smaller profit and potential “knock-out” goods, planned for eliminating from the range of goods. Besides that the whole range of goods of the enterprise is divided into groups depending on sales stability.

Combination of ABC and ZYX analyses is proposed for the most efficient decision-making in sales management. The methods of the analysis presented can be used not only as sales management tool but also as a strategic analysis object the results of which can be used in decision making on enterprise strategic development: to improve the efficiency of sales management system and the share of high-profit goods without violation of assortment policy principles; to reveal key goods and the reasons influencing the number of the goods stored in the warehouse; to redistribute personnel efforts depending on their qualification and experience.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ ДЛЯ ЖУРНАЛА «Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого»

Желающие опубликовать свои научные работы в журнале «Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого», могут подать материалы в соответствии с требованиями, приведенными ниже, в редакцию журнала по адресу: Республика Беларусь, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48, каб. 1-517, тел. +375 232 401 568, факс +375 232 479 165 (патентно-информационный отдел), e-mail: machin@gstu.by.

В ЖУРНАЛЕ ПРЕДУСМОТРЕНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РУБРИКИ:

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Машиностроение и машиноведение• Теоретическая физика• Физика высоких энергий• Обработка конструкционных материалов | <ul style="list-style-type: none">• Информатика, вычислительная техника и управление• Электротехника и энергетика• Экономика и управление народным хозяйством• Хроника научной жизни |
|---|---|

Статья, направляемая в редакцию рецензируемого журнала, должна являться оригинальным материалом, неопубликованным ранее в других печатных изданиях, соответствовать профилю журнала и отвечать следующим требованиям:

- Статья представляется в 2-х экземплярах на белорусском или русском языке. Одновременно текст статьи представляется на электронном носителе в формате MS Word.

- Авторские оригиналы принимаются на белорусском или русском языке.

- Статьи включают следующие элементы: аннотацию; ключевые слова или словосочетания; название; фамилии и инициалы авторов; введение; основную часть, включающую графики и другой иллюстративный материал (при их наличии); заключение, завершаемое четко сформулированными выводами; список цитированных источников; дату поступления статьи в редакцию.

- *Аннотация* (100–150 слов) должна ясно излагать содержание статьи и быть пригодной для опубликования в журнале отдельно от статьи на русском (белорусском) и английском языках.

- *Название статьи* должно быть кратким и отражать основную идею выполненного исследования. На первой странице в левом верхнем углу следует указать индекс статьи по универсальной десятичной классификации (УДК), под ним – название статьи, затем фамилии и инициалы авторов с указанием организаций, которые они представляют.

Пример:

УДК 658.336:331

РАЗРАБОТКА ФИЛОСОФИИ ПРЕДПРИЯТИЯ

К. М. ИВАНОВ, Л. Б. ПЕТРОВ

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

- В разделе «*Введение*» должен быть дан краткий обзор литературы по данной проблеме, указаны не решенные ранее вопросы, сформулирована и обоснована цель работы и, если необходимо, указана ее связь с важными научными и практическими направлениями. Во введении следует избегать специфических понятий и терминов. Содержание введения должно быть понятным также и неспециалистам в соответствующей области.

- Анализ источников, использованных при подготовке научной статьи, должен свидетельствовать о знании автором (авторами) статьи научных достижений в соответствующей области. В этой связи обязательными являются ссылки на работы других авторов. При этом должны присутствовать ссылки на публикации последних лет, включая зарубежные публикации в данной области.

- *Основная часть* статьи должна содержать описание методики, аппаратуры, объектов исследования и подробно освещать содержание исследований, проведенных автором (авторами). Полученные результаты должны быть обоснованы с точки зрения их научной новизны и сопоставлены с соответствующими известными данными.

- *Основная часть* статьи может делиться на подразделы (с разяснительными заголовками) и содержать анализ последних публикаций, посвященных решению вопросов, относящихся к данным подразделам.

- В разделе «*Заключение*» должны быть в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения. При необходимости должны быть также указаны границы применимости полученных результатов.

- Рисунки, графики, диаграммы, схемы и другие графические материалы, приводимые в статье, должны быть **вставлены** в текст статьи и прилагаться к авторскому оригиналу в 2-х экземплярах с подрисовочными подписями на отдельных листах белой бумаги или кальке формата А4 (подготовлены на компьютере с использованием графических программ) в виде распечатки на **лазерном принтере** (с разрешением не менее 300 dpi). Представленные графические материалы **должны соответствовать ЕСКД**.

- Полутонные фотографии (**в виде оригиналов**) представляются на глянцевої бумаге с контрастным изображением. Минимальный размер фотографии – 6х6, максимальный – 10х15 см.

- В тексте статьи должны содержаться ссылки на иллюстративные материалы. Число иллюстраций – 4–5 (просим учесть, что при этом иллюстрации, обозначенные под одним номером буквами *a*, *b* и т. д., считаются отдельными иллюстрациями).

- Таблицы (в табличном редакторе *MS Word*) и формулы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь тематический заголовок.

- При упоминании иностранных фамилий в тексте в скобках дается их оригинальное написание (за исключением общеизвестных фамилий, встречающихся в энциклопедии, и фамилий, на которые даются ссылки в списке литературы).

- При упоминании иностранных учреждений, фирм, фирменных продуктов и т. д. в русской транслитерации в скобках должно быть дано их оригинальное написание.

- Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т. е., и т. д., и т. п.).

- Пронумерованный список использованной литературы дается в конце статьи под заголовком «Литература». Порядковые номера ссылок на литературные источники должны быть написаны внутри квадратных скобок (например: [1], [2]). Перечень использованных источников должен начинаться с фамилии и инициалов автора и включать:

для книг – название, место и год издания, издательство, номер тома, страницы;

для журнальных статей – название журнала, год издания, номер тома (выпуска), страницы;

для газет – название, год, номер, месяц, число.

- Ссылки на неопубликованные работы записываются.

- Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны

иметь соответствующее разрешение на опубликование.

К авторскому оригиналу в обязательном порядке прилагаются:

- Экспертное заключение.
- Сопроводительное письмо от организации.
- Полные сведения об авторах с указанием должности, места работы, рабочего и домашнего телефонов.

Статьи представляются в формате:

- посредством электронной почты (*machin@gstu.by*) в редакторе *MS Word 97* и выше, гарнитура *Times New Roman* размером 12 пунктов;

- выравнивание по ширине страницы;

- автоматическая расстановка переносов (расстановка переносов вручную – *недопустима*);

- междустрочный интервал – одинарный, абзацный отступ – 5 мм;

- поля: верхнее, нижнее и правое – 25 мм, левое – 30 мм, расстояние от края до колонти-тулов – 20 мм;

- чертежи, графики и диаграммы сканируются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белое изображение, сохраняются в формате *Tiff*, представляются каждый в отдельном файле;

- иллюстрации, подготовленные средствами *Microsoft Office*, предоставляются в виде отдельных файлов;

- формулы в тексте набираются с помощью встроенного в *MS Word* редактора формул *Microsoft Equation*, стиль *математический*, размер «по умолчанию». Параметры для *Microsoft Equation* при наборе формул следующие: шрифт *Times New Roman*; величины *переменных* набираются курсивом. При использовании *кириллицы и греческих букв* для написания *Обычного* текста и текста нижних индексов, начертание букв – *прямое* (кроме *переменных*). При написании цифр дробная часть от целой отделяется запятой, начертание – *прямое*.

Пример:

$$y_1 = \int_n^i R_n \sin \left[\frac{C_p}{2\alpha\delta R} \ln \frac{T_{кр}}{T_1} + \arcsin \frac{y_0}{R^i} \right]. \quad (1)$$

Авторские оригиналы, не отвечающие вышеперечисленным требованиям, отклоняются редколлегией и не возвращаются. В случае возвращения статьи на доработку автору датой представления статьи в редакцию считается день получения окончательного варианта.



ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
Учреждения образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»

Основные направления деятельности: выпуск учебной, научной, научно-популярной, производственно-практической и справочной литературы; производство бланочной и иной полиграфической продукции; розничная торговля книжно-журнальной продукцией и канцелярскими товарами; оказание платных услуг студентам и профессорско-преподавательскому составу университета, а также сторонним организациям за наличный и безналичный расчет.

ПЕРЕЧЕНЬ ОКАЗЫВАЕМЫХ УСЛУГ

- полный комплекс издательско-полиграфических услуг по подготовке и изданию учебной, научной и других видов литературы*;
- печать и полиграфическое исполнение книжных изданий в мягком переплете;
- печать бланочной продукции для бухгалтерии и делопроизводства (форматы от А6 до А3) на собственном полиграфическом оборудовании и в кратчайшие сроки;
- копирование и тиражирование технической и другой документации с бумажных, магнитных (дискеты), оптических (CD-R, CD-RW) и других носителей информации;
- переплет технической и бухгалтерской документации, в том числе и с использованием пластиковых пружинок и обложек;
- печать цветных этикеток, ярлыков на бумаге различной плотности;
- полноцветная цифровая печать на цветных лазерном и струйном принтерах;
- широкоформатная цветная и черно-белая печать чертежей и плакатов формата А1 на плоттере.

**В соответствии со специальным разрешением (лицензией) на право осуществления издательской деятельности № 02330/0549424, выданным Министерством информации Республики Беларусь 08.04.2009 г. сроком на 5 лет.*

**По всем вопросам обращаться: 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48, корпус 2,
Издательский центр ГГТУ им. П. О. Сухого, тел. +375 232 477 164,
факс +375 232 479 165.**

**ПРИГЛАШАЕМ
К ВЗАИМОВЫГОДНОМУ СОТРУДНИЧЕСТВУ!**

