

ISSN 2521-6406

Збірник наукових праць

**КОМП'ЮТЕРНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ:
АНАЛІЗ, УПРАВЛІННЯ,
ОПТИМІЗАЦІЯ**

**№1 (1)
2017**

Р е д а к ц і й н а к о л е г і я

Головний редактор *д.т.н., проф.* ЗЕЛЕНЦОВ Дмитро Гегемонович
Замісник головного редактора *д.ф.-м.н., проф.* КОСОЛАП Анатолій Іванович
Відповідальний секретар *к.т.н., доц.* ЛЯШЕНКО Оксана Анатоліївна

БОМБА Андрій Ярославович д.т.н., проф., ГНАТУШЕНКО Володимир Володимирович д.т.н., проф., ГОЛОДНОВ Олександр Іванович д.т.н., проф., КАІРОВ Олексій Сергійович д.т.н., проф., КОРОТКА Лариса Іванівна к.т.н., доц., ЛЯШЕНКО Віктор Павлович д.т.н., проф., МАТВІЙЧУК Андрій Вікторович д.е.н., проф., МУХІН Вадим Євгенович д.т.н., проф., НАУМЕНКО Наталія Юріївна к.т.н., доц., ОЛЕВСЬКИЙ Віктор Ісаакович д.т.н., проф., СОЛОДКА Наталія Олександрівна к.т.н., доц., ТАРАНЕНКО Юрій Карлович д.т.н., проф., ФЕДОРОВ Євген Євгенович д.т.н., проф., ФЕДОРОВИЧ Олег Євгенович д.т.н., проф., ХАРЧЕНКО Олександр Васильович д.х.н., проф.

М і ж н а р о д н а р е д а к ц і й н а к о л е г і я

V. VISHNU Vardhan (*India*), MAMEDOV Arif (*The Republic of Azerbaijan*), MILENIN Andrij (*Poland*), MUSAYEV Vidadi (*The Republic of Azerbaijan*), STAROVOITOV Eduard (*Republic of Belarus*), ZILINSKAS Julius (*Lithuania*), SHARY Sergey (*Russian Federation*)

Комп'ютерна верстка *Л.П. БУРМІСТР*
Технічний редактор *Л.М. ТОНКОШКУР*

Адреса редакції видавника збірника:

Україна, 49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 8
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»
тел. (0562) 47-35-27, E-mail: smaco@udhtu.edu.ua

Зареєстровано 28.02.2017 Міністерством юстиції України серія КВ № 22571-12471Р

Рекомендовано до друку вченою радою ДВНЗ УДХТУ
(протокол № 8 від 29.08.2017)

Оригінал-макет виготовлено РВВ ДВНЗ УДХТУ.
Підписано до друку з готових форм 06.09.2017. Формат 60×84 1/8. Папір ксероксний.
Гарнітура Академічна. Друк різнограф. Умовн. друк. арк. 10,37. Обл. вид. арк. 10,46.
Тираж 300 прим. Замовлення № 652

Тираж віддруковано РВВ ДВНЗ УДХТУ,
м. Дніпро, пр. Гагаріна, 8, тел. (0562) 47-26-68
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5026 від 16.12.2015 р.

Дніпро 2017

УДК 621.777.06.004.083.133

Баюл К.В., Худяков А.Ю., Ващенко С.В., Солодкая Н.А.

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ БАНДАЖЕЙ ВАЛКОВЫХ ПРЕССОВ

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, г. Днепр

Показана актуальность и пути формирования научно-обоснованного метода определения рациональной калибровки валков брикетных прессов на основе анализа связей между параметрами калибровки бандажей и характеристиками процесса брикетирования. Предложены критерии оценки и выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов, обеспечивающей заданную величину уплотнения шихты, максимальную равномерность распределения напряжений, остаточных упругих деформаций и плотности в брикете, при минимальных значениях энергосиловых параметров, заданной производительности и максимальной продолжительности эксплуатации бандажей пресса. Принятые критерии позволяют сформулировать гипотезу выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов. Данная гипотеза предполагает комплексный анализ влияния конфигурации формующих элементов на совокупность энергосиловых и технологических параметров брикетирования на различных стадиях эксплуатации бандажей. Критерии и гипотеза выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов сформулированы впервые и будут использованы при создании комплексного расчетно-аналитического метода определения рациональных параметров формующих элементов бандажей валковых брикетных прессов. В дальнейшем, при получении новых результатов теоретических и экспериментальных исследований, предложенные критерии и гипотеза могут быть трансформированы и дополнены.

Ключевые слова: валковый пресс, брикетирование, калибровка, формующие элементы.

Постановка проблемы

В валковых прессах формирование брикетов происходит в формующих элементах сложной криволинейной конфигурации, выполненных на рабочих поверхностях бандажей. Получение брикетов, которые соответствуют требованиям, предъявляемым к металлургическому сырью (форма, размер, плотность и прочность), в значительной степени определяются калибровкой рабочих поверхностей валков. Формующие элементы, кроме диаметров, ширины валков и зазора между прессующими поверхностями, являются основной составляющей калибровки бандажей валкового пресса.

Опираясь на практический и теоретический опыт исследования процесса брикетирования и прокатки порошковых сред, принята следующая система понятий калибровки бандажей валковых брикетных прессов.

Формующий элемент – область межвалкового пространства, ограниченная двумя ячейка-

ми или ячейкой и ручьем (для зубчато-желобчатых формующих элементов), включающая зазор между валками в их рабочем положении, замыкание формующего элемента происходит вблизи линии, соединяющей центры валков.

Ячейка – углубление заданной формы и размеров на рабочей поверхности валка.

Желоб – кольцевой вырез заданной формы и размеров на рабочей поверхности валка.

По расположению осей симметрии различают формующие элементы: 1) с полной симметрией, имеющие две оси симметрии – вертикальную и горизонтальную; 2) с неполной или одноосной симметрией, имеющие одну ось симметрии; 3) асимметричные.

По способу замыкания формующие элементы делятся на: 1) открытого типа: разъем находится в пределах контура формующего элемента, к такому типу относятся линзовидные и подушкообразные формующие элементы [1–2] с полной симметрией, образуемые смыканием

двух полуформ; 2) закрытого типа: разъем находится за пределами контура формирующего элемента, к такому типу относятся зубчато-желобчатые формирующие элементы [1–2].

Калибровка бандажей валковых прессов – геометрические соотношения и размеры формирующих элементов с учетом радиуса рабочих поверхностей валков, обеспечивающие получение брикетов с заданными характеристиками.

Анализ последних исследований показывает, что в настоящее время в мировой практике отсутствует комплексный системный подход и четко сформированные критерии оценки калибровки бандажей валковых брикетных прессов.

Поэтому актуальным является формирование научно-обоснованного метода определения рациональной калибровки валков брикетных прессов на основе анализа связей между геометрическими параметрами формирующих элементов и характеристиками процесса брикетирования с учетом влияния физико-механических свойств шихты, величины износа формирующих элементов, упругого последствия в брикетах и т.д. Создание комплексного системного подхода к установлению оптимальной калибровки бандажей валковых прессов позволит при разработке и проектировании пресса учесть совокупное влияние следующих факторов:

- требований, предъявляемых к продукции (форма, размеры, плотность, прочность и др.);
- физико-механических характеристик шихты и энергосиловых параметров брикетирования;
- износа рабочих поверхностей валков;
- упругого последствия в брикетах и т.д.

В результате выполнения специалистами Института черной металлургии работ [1–8], посвященных исследованию влияния конфигурации формирующих элементов валковых прессов на параметры брикетирования, в том числе на разных стадиях эксплуатации валков, накоплен объем знаний, который позволяет подойти к решению задачи создания комплексного системного подхода к определению рациональных параметров калибровки бандажей.

Для создания такого комплексного подхода и метода необходимо:

- обосновать критерии выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов, которая обеспечивает получение брикетов с необходимыми характеристиками и благоприятные условия работы прессового оборудования – силовой режим и длительную эксплуатацию (при рациональных энергосиловых параметрах прессы и длительной эксплуатации бандажей валков);

- исследовать взаимосвязи между параметрами калибровки бандажей и характеристиками процесса брикетирования с учетом влияния физико-механических свойств шихты, величины износа формирующих элементов, упругого последствия в брикетах и т.д.;

- разработать структурную схему и алгоритм интеллектуальной системы для определения рациональной калибровки валков пресса.

Для формирования критериев, которые позволят разработать систему совместного анализа влияния различных факторов на эффективность калибровки бандажей валковых прессов, выделены основные характеристики процесса брикетирования и работы прессового оборудования, на которые оказывает влияние калибровка:

- технологические режимы брикетирования;
- качество брикетов;
- энергосиловые характеристики процесса;
- производительность;
- ресурс эксплуатации бандажей.

Цель исследования

Целью исследования является формирование критериев выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов, которые в дальнейшем будут рассматриваться совместно в составе комплексного системного подхода к выбору рациональной калибровки бандажей валковых брикетных прессов.

Изложение основного материала исследований

Качество брикетов в значительной степени зависит от величины уплотнения брикетируемого материала. Из всех возможных типов калибровки рациональным будет являться тот, который позволит достигать максимально возможной (Ky_{max}) или заданной оптимальной (Ky_{opt}) величины коэффициента уплотнения Ky шихты:

$$Ky_i \rightarrow Ky_{max} \text{ или } Ky_i \rightarrow Ky_{opt} . \quad (1)$$

Основными характеристиками, по которым можно судить о качестве брикетов еще на стадии их формирования являются величина и распределение напряжений, коэффициента уплотнения и плотности. Кривизна контуров формирующих элементов обуславливает сложное напряженно-деформированное состояние шихты в процессе ее уплотнения, характеризующее наличием интенсивных сдвиговых деформаций. Значительная неравномерность характеристик уплотнения (напряжение и плотность), вызванная влиянием геометрических параметров формиру-

ших элементов и упругим расширением после снятия нагрузки, может привести не только к разуплотнению брикетов, снижению прочности, но и к возникновению различного рода дефектов в виде трещин и расслоений [8]. Поэтому для оценки степени влияния калибровки на показатели уплотнения и качество брикетов предложено ввести понятие коэффициентов неравномерности и степени неравномерности характеристик уплотнения в брикете.

Коэффициенты неравномерности напряжений η_σ , уплотнения η_{Ky} и плотности η_{ρ_1} показывают, во сколько раз отличается максимальное значение исследуемого показателя от его средней величины на рассматриваемом участке, и определяются выражениями:

$$\eta_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{sr}}; \eta_{Ky} = \frac{Ky_{\max}}{K_{sr}}; \eta_{\rho_1} = \frac{\rho_{1.\max}}{\rho_{1.sr}}, \quad (2)$$

где σ_{\max} , Ky_{\max} , $\rho_{1.\max}$ – максимальные значения напряжений σ_i , коэффициента уплотнения Ky_i и плотности $\rho_{1.i}$ с учетом упругого расширения вдоль рассматриваемого направления в сечении брикета.

Средние значения σ_{sr} , Ky_{sr} , $\rho_{1.sr}$ напряжений σ_i , коэффициента уплотнения Ky_i и плотности $\rho_{1.i}$ с учетом упругого расширения вдоль рассматриваемого направления в сечении брикета определяются выражениями:

$$\sigma_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n}; Ky_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n Ky_i}{n}; \rho_{1.sr} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{1.i}}{n}, \quad (3)$$

где n – количество точек вдоль анализируемого направления в сечении брикета – определяется путем численного эксперимента для обеспечения заданной степени точности определения оцениваемых критериев. При идеализированных условиях прессования мелкофракционного материала предполагается отсутствие потерь давления прессования из-за межчастичного трения и трения на контакте с прессующим инструментом распределение характеристик уплотнения будет равномерным, то есть коэффициенты η_σ , η_{Ky} и η_{ρ_1} будут равны 1. В реальных процессах уплотнения мелкофракционных материалов всегда присутствует неравномерность распределения характеристик уплотнения σ_i , Ky_i , ρ_i , вызванная сложным напряженно-деформированным состоянием, которое обусловлено конфигурацией прессующего инструмента, условиями его взаимодействия с уплотня-

емым материалом, межчастичным трением и др. Поэтому значения предлагаемых коэффициентов η_σ , η_{Ky} и η_{ρ_1} всегда будут больше единицы. По мере увеличения значения данных коэффициентов растет неравномерность вдоль рассматриваемого направления в анализируемом формующем элементе. Использование одного типа показателей для оценки неравномерности исследуемых показателей не всегда может давать корректные результаты, поэтому предложена еще одна группа показателей, которые позволяют провести дополнительную оценку неравномерности уплотнения брикетируемой шихты. В качестве таких дополнительных показателей предложено использовать степень неравномерности напряжений δ_σ , коэффициента уплотнения δ_{Ky} и плотности δ_{ρ_1} , которая будет определяться согласно следующим выражениям:

$$\delta_\sigma = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{srv}}; \delta_{Ky} = \frac{Ky_{\max} - Ky_{\min}}{K_{srv}};$$

$$\delta_{\rho_1} = \frac{\rho_{1.\max} - \rho_{1.\min}}{\rho_{1.srv}}, \quad (4)$$

где σ_{\min} , Ky_{\min} , $\rho_{1.\min}$ – минимальные значения напряжений σ_i , коэффициента уплотнения Ky_i и плотности $\rho_{1.i}$ с учетом упругого расширения вдоль рассматриваемого направления в сечении брикета; σ_{srv} , Ky_{srv} , $\rho_{1.srv}$ – средневзвешенные значения напряжений σ_i , коэффициента уплотнения Ky_i и плотности $\rho_{1.i}$ с учетом упругого расширения вдоль рассматриваемого направления в сечении брикета, определяемые по выражениям:

$$\sigma_{srv} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_{\sigma.i} \cdot \sigma_i}{\omega_{\sigma.i}}; Ky_{srv} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_{Ky.i} \cdot Ky_i}{\omega_{Ky.i}};$$

$$\rho_{1.srv} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_{\rho_1.i} \cdot \rho_{1.i}}{\omega_{\rho_1.i}}, \quad (5)$$

где $\omega_{\sigma.i}$, $\omega_{Ky.i}$, $\omega_{\rho_1.i}$ – вещественный вес напряжений σ_i , коэффициента уплотнения Ky_i и плотности $\rho_{1.i}$ с учетом упругого расширения вдоль рассматриваемого направления в сечении брикета.

В выражениях (5) дискретность n определяется правилами аналогичными для выраже-

ний (3). Критерием оценки рациональности калибровки при использовании выражений (2) и (4) является минимальная степень неравномерности анализируемых показателей. Это условие можно записать в следующем виде:

$$\eta_{\sigma}, \eta_{K_y}, \eta_{\rho_1} \rightarrow 1; \quad \delta_{\sigma}, \delta_{K_y}, \delta_{\rho_1} \rightarrow 0. \quad (6)$$

Совместное использование при анализе рациональности калибровки критериев (5) и (6) позволит определить эффективность каждого из них.

Сложная геометрия прессующих поверхностей валков приводит к неравномерному соотношению радиальных и окружных составляющих давления прессования вдоль поверхностей валков. В свою очередь, неравномерное распределение составляющих давления прессования вдоль контуров формующих элементов оказывает влияние на значения энергосиловых параметров – усилие P_i и момент M_i прессования. Следовательно, при использовании различных типов калибровки заданная величина уплотнения шихты будет достигаться при различных значениях энергосиловых параметров, что доказано в ряде работ [1–3]. Исходя из этого, в качестве критерия рациональности калибровки по энергосиловым параметрам предлагается принять минимальное значение усилия P_i и момента прессования M_i . Согласно данному критерию наиболее оптимальными из рассматриваемых типоразмеров формующих элементов будет являться тот, для которого при достижении заданной величины уплотнения шихты значения энергосиловых параметров будут минимальными:

$$P_i, M_i \rightarrow P_{\min}, M_{\min}. \quad (7)$$

Конфигурация формующих элементов оказывает влияние на производительность Q . Учитывая это, предлагается принять критерий оценки, согласно которому наиболее предпочтительной является та калибровка, которая обеспечивает максимальную (Q_{\max}) или заданную оптимальную (Q_{opt}) величину производительности Q_i при достижении заданной величины уплотнения брикетированной шихты:

$$Q_i \rightarrow Q_{\max} \quad \text{или} \quad Q_i \rightarrow Q_{opt}. \quad (8)$$

Немаловажным показателем эффективности конструктивного исполнения бандажей является длительность их эксплуатации. Несомненно, интенсивность износа бандажей определяется, прежде всего, условиями взаимодействия

уплотняемой шихты с рабочими поверхностями валков и определяющее значение здесь имеют соотношения твердости частиц уплотняемого материала и материала валков. Тем не менее, теоретические расчеты [5–6] и практический опыт показывают, что в зависимости от конфигурации и размеров формующих элементов максимальная степень износа бандажей, при которой возможно производство брикетов с заданной степенью уплотнения различна. Поэтому в качестве критерия эффективности калибровки, характеризующего ресурс эксплуатации бандажей, принята величина максимально допустимого износа формующих элементов δ_{\max} . Согласно этому критерию наиболее эффективной конфигурацией формующих элементов является та, которая обеспечивает максимальный период эксплуатации при соблюдении условия получения брикетов требуемого качества:

$$\delta_{\max} \rightarrow \max \delta_{\max}. \quad (9)$$

Таким образом, предложены критерии выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов:

1. Максимальная или оптимальная величина уплотнения.
2. Максимальная равномерность уплотнения.
3. Минимальные энергосиловые характеристики.
4. Максимальная или заданная производительности.
5. Максимальная продолжительность эксплуатации бандажей.

Принятые критерии позволяют сформулировать гипотезу выбора рациональной калибровки бандажей валковых прессов. Для заданных условий брикетирования среди возможных вариантов калибровки, рациональным является тот, который обеспечивает заданную величину уплотнения шихты, максимальную равномерность распределения напряжений, остаточных упругих деформаций и плотности в брикете, при минимальных значениях энергосиловых параметров, заданной производительности и максимальной продолжительности эксплуатации бандажей пресса. Данная гипотеза предполагает комплексный анализ влияния конфигурации формующих элементов на совокупность энергосиловых и технологических параметров брикетирования на различных стадиях эксплуатации бандажей.

Выводы

Критерии (1)–(9) и гипотеза выбора рации-

ональной калибровки бандажей валковых прессов сформулированы впервые и будут использованы при создании комплексного расчетно-аналитического метода определения рациональных параметров формирующих элементов бандажей валковых брикетных прессов. В дальнейшем, при получении новых результатов теоретических и экспериментальных исследований, предложенные критерии и гипотеза могут быть трансформированы и дополнены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носков В.А. Создание и внедрение прессового оборудования для брикетирования мелкофракционных металлургических отходов: Дис... д-ра техн. наук: 05.05.08. – Днепропетровск: Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, 2001. – 318 с.
2. Баюл К.В. Разработка параметров формирующих элементов валковых прессов для брикетирования мелкофракционных металлургических отходов: 05.05.08. – Дис... канд. техн. наук: Днепропетровск: НМетАУ, 2008. – 173 с.
3. Vayul K.V. Effect of the geometrical parameters of roll press forming elements on the briquetting process: analytical study // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – July 2012. – Vol.51. – Issue 3-4. – P.157-164.
4. Баюл К.В., Петренко В.И., Маймур Б.Н. Выбор концепции и методов исследования влияния износа бандажей валковых прессов на технологические и энергосиловые параметры процесса брикетирования // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Днепропетровск: ІЧМ НАН України, 2011. – Вип. 24. – С. 241-246.
5. Баюл К.В., Петренко В.И. Метод оценки износа бандажей валковых прессов на различных стадиях их эксплуатации // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Днепропетровск: ІЧМ НАН України. – 2012. – Вип. 26. – С. 270-281.
6. Баюл К.В., Петренко В.И. Метод оценки влияния износа бандажей валковых прессов на технологические и энергосиловые параметры брикетирования // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Днепропетровск: ІЧМ НАН України. – 2013. – Вип. 27. – С. 266-274.
7. Баюл К.В., Петренко В.И. Разработка экспертной системы принятия оптимальных решений, обеспечивающих увеличение ресурса эксплуатации бандажей валковых прессов // Системні технології. – Днепропетровськ, 2013. – Вип. 2 (85). – С. 3-11.
8. Исследование влияния конфигурации формирующих элементов и параметров уплотнения на упругое последствие в брикетах Отчет о научно-исследовательской работе ТО.011.15 (заключительный) / Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины; рук. Баюл К.В.; исполн.: Ващенко С.В., Худяков А.Ю., Солодкая Н.А., Прокудина Э.Б. – Днепропетровск, 2015. – 66 с. – № госрегистрации 0115U001067.

Поступила в редакцию 10.10.2016
Рецензент: д.т.н, с.н.с. Муравьева И.Г.

РОЗРОБКА КРИТЕРІЇВ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНОГО КАЛІБРУВАННЯ БАНДАЖІВ ВАЛКОВИХ ПРЕСІВ

Баюл К.В., Худяков О.Ю., Ващенко С.В., Солодка Н.О.

Показано актуальність і шляхи формування науково-обґрунтованого методу визначення раціонального калібрування валків брикетних пресів на основі аналізу зв'язків між параметрами калібрування бандажів і характеристиками процесу брикетування. Запропоновано критерії оцінки та вибору раціонального калібрування бандажів валкових пресів, що забезпечує задану величину ущільнення шихти, максимальну рівномірність розподілу напружень, залишкових пружних деформацій і щільності в брикеті, при мінімальних значеннях енергосилових параметрів, заданої продуктивності і максимальної тривалості експлуатації бандажів преса. Прийняті критерії дозволяють сформулювати гіпотезу вибору раціональної калібровки бандажів валкових пресів. Дана гіпотеза передбачає комплексний аналіз впливу конфігурації формируючих елементів на сукупність енергосилових та технологічних параметрів брикетування на різних стадіях експлуатації бандажів. Критерії та гіпотеза вибору раціональної калібровки бандажів валкових пресів сформульовано вперше та буде використано при створенні комплексного розрахунково-аналітичного методу визначення раціональних параметрів формируючих елементів бандажів валкових брикетних пресів. У подальшому, при отриманні нових результатів теоретичних та експериментальних досліджень запропоновані критерії та гіпотеза можуть бути трансформовані та доповнені.

Ключові слова: валковий прес, брикетування, калібрування, формиуючі елементи.

DEVELOPMENT OF CRITERIA FOR SELECTION RATIONAL CALIBRATION OF BRIQUETTING RINGS OF ROLLER PRESSES

Baiul K.V., Khudyakov A.Yu., Vaschenko S.V., Solodkaya N.A.

The relevance and ways of forming a scientifically grounded method for determining the rational calibration of rolls of briquette presses are shown on the basis of analysis of the relationships between the parameters of bandage calibration and the characteristics of the briquetting process. The criteria for evaluating and selecting rational calibration of pressing rings of roller press providing a specified value for the compacting of charge, the maximum uniformity of stress distribution, residual elastic deformations and density in a briquette, with minimum values of energy-strength parameters, a given productivity and maximum operating life of the pressing rings are proposed. The accepted criteria allow to formulate a hypothesis of a rational bandages calibration choice of roller presses. This hypothesis presupposes a comprehensive analysis of forming elements configuration influence on the aggregate of energy and technological parameters of briquetting at various stages of operation of bandages. The criteria and the hypothesis of choosing a rational calibration of banding presses for roller presses are formulated for the first time and will be used to create a comprehensive calculation and analysis method for determining the rational parameters of the forming elements of the bandages of briquette presses. Later, when new results of theoretical and experimental studies are received, the proposed criteria and hypothesis can be transformed and supplemented.

Keywords: roller press, briquetting, calibration, forming elements.

УДК 004.94

Грод І.М.

ПРОГНОЗУВАННЯ ЧИСЕЛЬНОСТІ ОКРЕМИХ ПОПУЛЯЦІЙ В ОДНІЙ ЕКОЛОГІЧНІЙ ЗОНІ

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, м. Тернопіль

В роботі розглядається моделювання процесів зміни динаміки популяцій під впливом різних факторів навколишнього середовища. Зроблено спробу спрогнозувати чисельність окремих популяцій в умовах нерівномірного розподілу видів і ресурсів, а також провести чисельне дослідження можливих сценаріїв співіснування і витіснення одного виду іншим. Конкуренцію можна визначити як використання якогось ресурсу (страви, води, світла, простору) яким-небудь організмом, який тим самим зменшує доступність цього ресурсу для інших організмів. Сутність міжвидової конкуренції полягає в тому, що у особин одного виду зменшується плодючість, виживання і швидкість відтворення. Для отримання результатів використовували обчислення швидкості зростання живої речовини в популяціях та обчислення коефіцієнтів максимально можливої біомаси. Прогнозовані показники відображено у вигляді графіків. Проведені обчислення дозволяють припустити, що при різних коефіцієнтах і певних значеннях параметрів можна добитися виходу на стійкі стаціонарні розподіли.

Ключові слова: модель, комп'ютерне моделювання, популяція, динаміка популяції, популяційна екологія, моделюючий об'єкт, двовимірні моделі, дискретні моделі, середовище Mathcad, мова програмування C#.

Постановка проблеми

Незалежно від того, що лежить в основі міжвидової конкуренції – використання одних і тих же ресурсів, боротьба за територію – вона може привести або до взаємного пристосування видів, або до витіснення одного виду іншим.

У реально існуючих природних екосистемах налічують десятки видів (популяцій, угруповань), що взаємодіють між собою.

Сукупність популяцій, що функціонують як цілісна одиниця у відведеному їй просторі фізичного природного середовища, являє собою біотичне угруповання.

Чисельність (щільність) цих популяцій з часом зазнає змін. Навіть якщо популяцію та екосистему вважають незмінними, щільність (кількість особин на одиницю площі або об'єму), народжуваність, рівень виживання (смертність), вікова структура, інтенсивність росту та інші характеристики, як правило, змінюються залежно від сезону, клімату, інших факторів навколишнього середовища.

Центральною проблемою в екології співтовариств є відшукання умов, що забезпечують

довготривале співіснування співтовариства як цілого чи вимирання деяких видів, яке призводить до нових довготривало-співіснуючих співтовариств. Варто враховувати, що тип взаємодії між різними видами популяцій може змінюватися від умов життя або стадій їх життєвих циклів, тобто він не є постійним.

Моделювання динаміки популяцій застосовується для вирішення таких, актуальних на сьогодні, завдань:

- збереження зникаючих і рідкісних видів;
- прогнозування чисельності промислових популяцій;
- розробка оптимальних стратегій промислу;
- вивчення міжвидової взаємодії;
- вивчення впливу антропогенних факторів на чисельність біологічних видів, тощо.

Екологічна криза сьогодні – це вже не проблема одного регіону чи країни – це проблема всього людства. Тільки знищивши, більшою мірою за останні два століття, флору і фауну планети, нас турбують проблеми виживання наступних поколінь.

Мета дослідження

Зазначені аргументи обумовили мету дослідження:

- змодельувати процес зміни динаміки певних популяцій під впливом різних факторів навколишнього середовища;
- дослідити антропогенний вплив на зміну чисельності цих популяцій;
- висвітлити проблеми популяційної динаміки;
- спрогнозувати зміну чисельності окремих популяцій.

Для розв'язання поставлених завдань було використано комплекс взаємопов'язаних методів:

- теоретичних – аналізу та узагальнення науково-педагогічної літератури з метою виявлення сучасного стану досліджуваної проблеми;
- емпіричних – спостереження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Жодне дослідження, включаючи і дослідження з біології та екології, не може бути повним і точним, якщо воно не супроводжується побудовою, хоча б найпростішою, але все ж таки математичної моделі досліджуваного об'єкта чи процесу. При цьому, чим складнішим є об'єкт чи процес, який розглядається, тим складніше знайти математичні абстракції, які підходять для його опису.

Математичні моделі описують клас об'єктів, явищ чи процесів, які мають спільні, подібні властивості або є ізоморфними. Багато класиків науки незалежно висловлювали одну і ту ж думку: «Область знання становиться наукою, коли вона висловлює свої закони у вигляді математичних співвідношень» [1]. Саме перші спроби математично описати біологічні процеси відносяться до процесів популяційної динаміки. Вивчення закономірностей динаміки чисельності популяцій необхідне для раціонального використання природних ресурсів. Основним припущенням, яке використовується при побудові математичних моделей динаміки зміни чисельності популяцій, є балансове співвідношення між різними групами у структурі популяції, враховуючи при цьому вплив різної природи факторів.

Побудова балансових співвідношень базується на основі простих припущень: приріст чисельності хижаків пов'язаний із швидкістю споживання жертв, врахувавши те, що при такому споживанні є неминучою втрата біомаси, а тому кількість народжених хижаків в жодному разі не може перевищувати кількість споживаних жертв. Кількість мігруючих популяцій з даної

території не може перевищити число популяцій, які проживають на ній.

Якщо вважати, що зовнішніх впливів на популяцію немає, тоді баланс чисельності популяції складається з таких основних факторів: народжуваність; смертність; імміграція; еміграція.

Для зручності вважатимемо, що чисельність деякого виду популяції є неперервною величиною. Такий клас задач на сьогоднішній день має розроблені математичні моделі, які використовують апарат диференціальних рівнянь.

Процес зміни чисельності популяції за невеликий проміжок часу Δt можна описати рівнянням:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + B(t, x(t))\Delta t - D(t, x(t))\Delta t, \quad (1)$$

де $B(t, x(t))$ – кількість народжених і таких, що емігрували; $D(t, x(t))$ – кількість померлих і таких, що іммігрували.

Очевидно, що $B(t, 0) \equiv 0$, $D(t, 0) \equiv 0$.

Перейшовши до границі при $\Delta t \rightarrow 0$, одержимо диференціальне рівняння:

$$\Delta t = B(t, x(t)) - D(t, x(t)).$$

Для сучасного моделювання систем «хижак-жертва» або «споживач-ресурс» широко застосовують таку систему рівнянь:

$$\frac{dR}{dt} = Q - V(R, N)N, \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = -mN + kV(R, N)N, \quad (3)$$

де R – кількість ресурсу; N – кількість (біомаса) особин популяції споживачів; Q – швидкість надходження ресурсу в систему; $V(R, N)$ – функція, яка моделює швидкість споживання ресурсу однією особою популяції (питома швидкість споживання); $k < 1$ – частина ресурсу, використовувана за продуктивних цілей; m – коефіцієнт смертності, обернено пропорційний середній тривалості життя особин в певних умовах навколишнього середовища.

Негативне ставлення одного виду до іншого, пов'язане з боротьбою за існування, за домінування, за їжу, простір та інші ресурси між організмами з однаковими потребами. У результаті конкуренції один вид скорочує ресурси іншого виду, який внаслідок цього повільніше росте, залишає менше число нащадків і має мен-

ше шансів вижити.

Для вивчення таких питань обов'язково використовуються математичні методи, зокрема, комп'ютерне моделювання. Актуальною темою на сьогоднішній день залишається розробка адекватного математичного апарата для вивчення чисельності динаміки популяцій.

В західних регіонах України, зокрема, поряд з суто фауністичними дослідженнями проводилися також екологічні дослідження тих чи інших популяцій (І.М. Грод, Л.О. Шевчик [2], В.І. Здун [3], А.П. Старниченко [4]).

Виклад основного матеріалу

Будемо розглядати сукупність взаємодіючих між собою популяцій. Під популяцією розуміється сукупність особин, що можуть давати життєздатне потомство й піддаються впливу однакових зовнішніх і внутрішніх факторів середовища існування. Вважатимемо, що ареал проживання особин популяції обмежений.

Сутність міжвидової конкуренції полягає в тому, що у особин одного виду зменшується плодючість, виживання і швидкість відтворення.

Так як маємо справу з різними популяціями, то звернемося до логістичного рівняння і спробуємо врахувати міжвидову конкуренцію.

Розглядаючи динаміку чисельності популяцій, екологи насамперед намагаються зрозуміти її закономірності, при якій особини одного виду впливають на особини іншого виду, і пояснити різницю між типами динамік.

Метою числового експерименту є аналіз

чисельності трьох видів. Для побудови математичної моделі використаємо вхідні дані: кількість трав'янистих – 100; кількість рослин – 200; кількість хижаків – 110; кількість рослин, які з'їдає одна особина популяції трав'янистих тварин – 1; кількість рослин на квадратний метр – 10; кількість трав'янистих, які з'їдає одна особина популяції хижака – 0,5; швидкість розмноження популяції трав'янистих тварин – 0,1; швидкість росту рослин – 40%; швидкість розмноження популяції хижака – 0,10001; доступна площа для розмноження рослин – 19; тривалість життєвого циклу – 12.

В роботі зроблено спробу спрогнозувати чисельність окремих популяцій (багаторічні трави, молюски (слимаки), дикі кабани) в умовах нерівномірного розподілу видів і ресурсів, а також провести чисельне дослідження можливих сценаріїв співіснування і витіснення одного виду іншим.

Числове моделювання здійснювалося на базі двох рівнянь:

1) рівняння для обчислення показника приросту популяції:

$$V_n = rN - \frac{r}{k} N^2, \text{ де } r = \frac{\ln(N_2) - \ln(N_1)}{t_2 - t_1};$$

2) рівняння для обчислення показника максимально можливої біомаси $N(t) = N_0 e^{r(t-t_0)}$.

Прогнозовані показники відображено у вигляді графіків (рис. 1), які отримали з допомогою системи програмування C#.

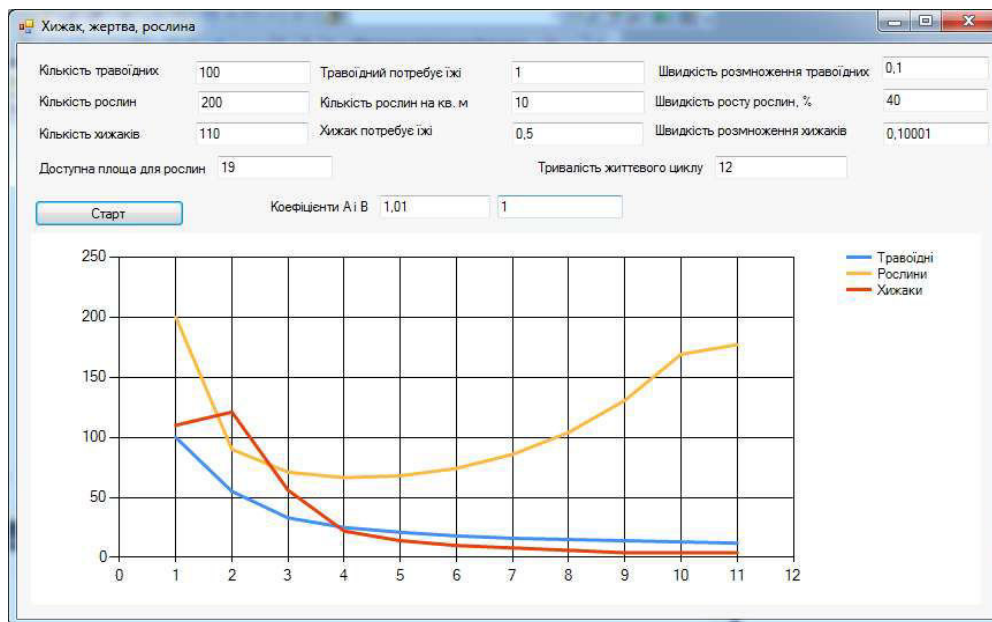


Рис. 1. Модель співвідношення популяцій на визначеній території (Microsoft Visual Studio C#)

Побудована модель (рис. 2) дає підстави зробити висновки, що згідно постановки задачі було правильно описано математичний функціонал, який дозволяє отримати її розв'язок. У обох розроблених комп'ютерних моделях отримали однаковий результат.

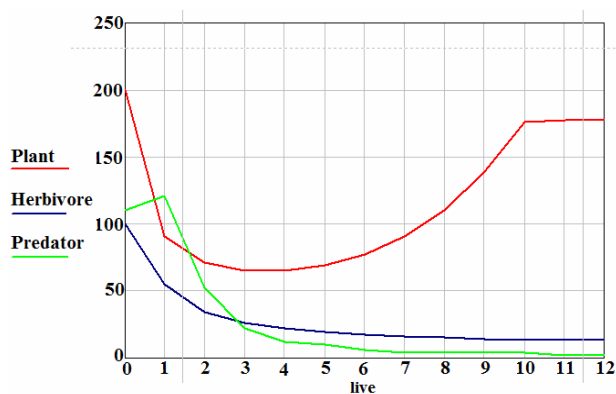


Рис. 2. Модель співвідношення популяцій на визначеній території (Mathcad)

Верифікацію розроблених моделей проведено за даними моніторингу певного виду популяцій, що були отримані студентами природничого факультету під час весняно-літньо-осінніх польових практик та звіти лісництва Чортківського району Тернопільської області (результати надані на рис. 1 та рис. 2).

Для того, щоб довести правильність постановки задачі та отриманого розв'язку цієї ж задачі засобами Microsoft VisualStudio C# 2010, побудовано комп'ютерну модель у середовищі Mathcad (рис. 2).

Висновки та перспективи подальших досліджень

Будь-яка популяція рослин, тварин чи мікроорганізмів – це досконала жива система, їй властива саморегуляція, відновлення своєї динамічної рівноваги. Але вона існує не ізольовано, а разом з популяціями інших видів, утворюючи таким чином біоценози.

Тому при математичному моделюванні динаміки популяції необхідно враховувати вплив багатьох факторів.

Розроблена математична модель адекватно описує основні фактори, які впливають на динаміку розвитку популяцій, що розглядаються.

Отримані результати знайшли підтвердження в процесі досліджень під час польових практик. Проведені обчислення дозволяють припустити, що при різних коефіцієнтах і певних значеннях параметрів можна добитися виходу на

стійкі стаціонарні розподіли. Вважаємо, що отримані результати можна застосовувати для прогнозування поведінки конкуруючих біосистем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бондарчук С.С., Перевозкин В.П. Математическое моделирование в популяционной экологии. – Томск: Томский государственный педагогический университет, 2014. – 233 с.
2. Грод І.М., Шевчик Л.О. Моделювання динаміки коливання біомаси та продуктивності популяцій виноградно-го слимака (*Helix pomatia*) у складі лісового біоценозу // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем: Збірник доп. I Всеукр. науково-техн. конф. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ. – 2015. – Ч.1. – С.60-64.
3. Здун В.І. До фауни молюсків Закарпаття // Наук. зап. наук.-природозн. музею УРСР. – 1960. – С.83-95.
4. Старниченко А.П., Старниченко Ю.А. К фауне і екології пресноводних молюсків (*Gastropoda, Bivalvia*) Українського Полесья // Гидробиол. журн. – 1984. – Т.20. – № 2. – С.36-40.
5. Моделювання і прогнозування стану довкілля: Підручник для студентів вищих навчальних закладів / Лаврик В.І., Боголюбов В.М., Полетаєва Л.М., Ільїна В.Г., Юрасов С.М. – К.: Академія, 2010. – 397 с.

Надійшла до редакції: 10.10.2016

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Боднар Д.І.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ В ОДНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

Грод І.Н.

В работе рассматривается моделирование процессов изменения динамики популяций под воздействием различных факторов окружающей среды. Сделана попытка спрогнозировать численность отдельных популяций в условиях неравномерного распределения видов и ресурсов, а также провести численное исследование возможных сценариев сосуществования и вытеснения одного вида другим. Конкуренцию можно определить как использование какого-то ресурса (еда, воды, света, пространства) каким-нибудь организмом, который тем самым уменьшает доступность этого ресурса для других организмов. Сущность конкуренции заключается в том, что у одной особи одного вида уменьшается плодовитость, выживаемость и скорость воспроизведения. Для получения результатов использовались вычисления скорости роста живого вещества в популяциях и вычисления коэффициентов максимально возможной биомассы. Прогнозируемые показатели отображены в виде графиков. Проведенные вычисления позволяют предположить, что при разных коэффициентах и определенных значениях параметров можно добиться выхода на устойчивые стационарные распределения.

Ключевые слова: модель, компьютерное моделирование, популяция, динамика популяции, популяционная экология, моделируемый объект, двумерные модели, дискретные модели, среда Mathcad, язык программирования C#.

OF PREDICTING THE SIZE OF INDIVIDUAL POPULATIONS IN ONE SAME ECOLOGICAL ZONE**Hrod I.N.**

This paper describes the modeling of the changes in the dynamics of populations under the influence of various environmental factors. An attempt is made to predict the number of individual populations in terms of the uneven distribution of species and resources, as well as to conduct a numerical study of possible scenarios of coexistence and displacement of one species by another. Competition can be defined as the use of some resource (food, water, light, space) any organism that reduces the availability of that resource to other organisms. The essence of interspecific competition is that individuals of one species reduce the fecundity, survival rate and playback speed. Used calculation formula of the rate of growth of living matter in the populations and the coefficients of the maximum possible biomass. The projected figures are displayed in graphs. At different coefficients and the specific values of the parameters it is possible to achieve stable stationary distributions.

Keywords: model, computer modeling, population, population dynamics, population ecology, modeling facility, two-dimensional model, discrete model, Mathcad environment, programming language C#.

Zelentsov D.G., Naumenko N.Yu., Gorbonos P.A.

SOFTWARE FOR DESIGN SYSTEMS OF FUZZY CONTROL AND CONDUCTING FUZZY-MULTIPLE CALCULATIONS

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro

The paper suggests a description of the design concept and ways to implement the library to work with data that are fuzzy. Based on a review of the latest researches in the field of fuzzy calculations, we formulated the basic requirements for software for performing fuzzy-multiple calculations. The aim of the work is the development of a software implemented as a modular library that satisfies the requirements of universality, integrability, speed, portability, completeness and independence. To ensure the flexibility of the library, the fuzzy data are differentiated into fuzzy sets and fuzzy numbers. We presented the implementation of a multi-purpose library for working with fuzzy data. We offered the description of the main stages of software design, the tool for their creation and the structure of library modules. We made a class diagram that shows the relationships in the library, and a description of the function modules for working with these classes. The developed software can be integrated into an existing or projected control system.

Keywords: fuzzy set, fuzzy control system, library.

Statement of the problem

In 1965, the Azerbaijani mathematician Lotfi Zadeh published the fundamental work on the theory of fuzzy sets, having based a separate direction of mathematics. In 1973, he proposed a theory of fuzzy logic, which initiated the application of the new mathematical theory in practice. Since then, the new mathematical apparatus has firmly entered the engineering and applied practice in many branches of science and technology. As examples of the use of fuzzy logic in practice, one can give the automatic gate control system of a dam in a hydroelectric power plant (Tokyo Electric Power), the aiming of cameras during the broadcast of sports events (Hirota, Fuji, Toshiba, Omron), control of air conditioning systems (Mitsubishi, Sharp), engine control and economical vehicle speed (Nissan), semiconductor manufacturing control (Canon), document archiving (Mitsubishi), character recognition (Sony), motion recognition (Canon) and many others [1]. The scope of fuzzy control systems, elements of fuzzy logic or at least its principles is extremely wide and continues to expand. In this connection, the problem arises of the tools for designing and developing fuzzy control systems. Today a large number of individual programs and complexes for fuzzy calculations have been produced. But existing software products and complexes for the development of fuzzy systems are

not flexible enough to include fuzzy calculations in a separate project, in the overwhelming majority they are commercial products, mostly focused on solving specific problems. Often, to build a project on the principles of fuzzy logic, it is necessary to develop from scratch the calculated part for the current task, which causes problems with the repeatability of using the resulting module. Therefore, the problem of the existence of a flexible open universal mechanism for developing fuzzy systems remains open.

Analysis of recent research and publications

During the existence of fuzzy calculations, a fairly large number of instruments were developed to implement fuzzy control systems.

One of the first to mention is the Fuzzy Logic Toolbox, which is part of MatLab environment. This software allows you to build fuzzy approximating systems, fuzzy expert systems, hybrid (neural network) systems, gives the opportunity to build quite complex rules systems, has a wide range of membership functions. At the same time, this software has a convenient graphical interface, in spite of this, you can work with it from the command line using an extensive set of commands. The software can also be used in the design of systems in Simulink environment [2-4].

One of the best-selling packages for the design of fuzzy systems is CubiCalc software from

HyperLogic. This software can be integrated into Microsoft Excel to perform fuzzy calculations in the form of tables, can be used with programs that support Visual Basic. The company also supplies an additional library for the design of neural networks based on fuzzy sets [5].

FuziCalc of FuziWare is also known as a software for working with fuzzy quantities. This software supports work with membership functions and tables of both exact and fuzzy values [6].

Among the well-known programs are Triumph-Analytic Corporation «Parus», software AnyLogic, ITHINK, PolyAnalyst, ExPro Master and others [7].

All of the above software products, in addition to being corporate and not freely available, have one thing in common: they are separate programs that can only be used to design fuzzy systems and can not be integrated into the finished project. For the project to work, a separate development of the calculation modules is necessary. In addition, all these software tools are not flexible enough to work, for example, with fuzzy arithmetic, since they are oriented to a rule base with fuzzy inference, which makes them at best inconvenient for solving particular problems.

There is a simple expert system FuzzyAdviser in free access, written in the language F# [8], but it is not universal when working with various fuzzy systems and can not be integrated directly into the developed control system.

A huge disadvantage is also the incompleteness of the provided instruments for calculation. In the overwhelming majority, the possibility of fuzzy inference is given only by Mamdani algorithm, less often – by Sugeno algorithm. Of the existing fuzzy operators, only those based on the minimax t-norm are used. This significantly limits the possibility of calculation.

Formulation of the research objective

The aim of the study is to develop a software that will meet the following requirements:

- universality: the software should provide all the possibilities for design fuzzy control systems, and for fuzzy calculations within the projects being developed;

- integrability: the software should provide the ability to conduct calculations outside its environment, as a component of the system being designed, that is, to perform the duties of a calculation module that transfers data directly to the control system in an automatic mode;

- speed: the software should provide a sufficiently high speed of operation in real conditions;

- portability: the software should provide the

ability to reuse in various fuzzy systems on different platforms;

- completeness: the software should provide a full set of possible fuzzy calculations;

- independence: the software should not depend on the details of the implementation of a particular platform.

Statement of the main research material

C++ was used as the programming language, the development was carried out in Visual Studio 2013 programming environment under Windows 7. To maintain universality, portability and independence, the software was designed as a modular library. The advantage of this approach is that the library written in C++ integrates well into almost any developed system, it is supported by quite a large number of environments and programming languages, it is well transferred to other operating systems (in particular – on Mac OS and on Unix/Linux). Since the library for working with fuzzy sets was planned to be independent of the platform implementations, the entire calculation part and the data structures for it were original solutions.

The first stage of development was the implementation of the abstract data type «set». As a basis, a data structure of the «red-black tree» type was written (Fig. 1). A red-black tree is a binary search tree with one additional bit of color in each node.

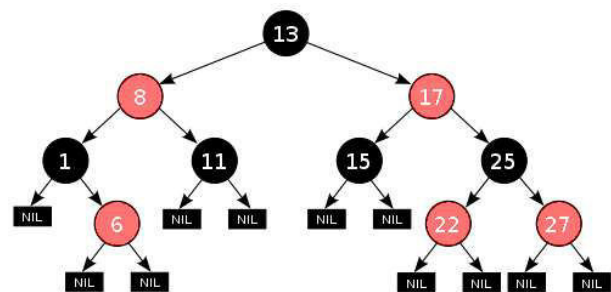


Fig. 1. Example of red-black tree

The color of the node can be either conditional red, or conditional black [9]. A red-black tree must satisfy the following properties:

- each node is either red or black;

- the root of the tree is a black node;

- each leaf of a tree (zero element) is a black node;

- if the node is red, then both children are black;

- for each node, all the simple paths from it to leaves that are descendants of this node contain the same number of black nodes [9].

These restrictions implement the main property of the red-black tree: the path from the root to the farthest leaf is no more than twice as long as the path from the root to the nearest leaf. As a result, the red-black tree is approximately balanced. Because of this, it satisfies the requirement of speed of operation, since the basic operations when working with this data structure (element search, insertion of a new element, and deletion of an element) occupy no more than $O(\log n)$ number of operations.

In this case, the red-black tree very well corresponds to the abstract data type «set», because it allows to store data in each node in the form necessary for us and at the same time excludes the appearance of duplicate elements of the set. All the operations necessary for working with the tree (delete, insert, search, search for the next, previous, etc.) were implemented. At the initial stages of the development of the library, a restriction was accepted that the used sets are finite and to each element there corresponds a certain value of the membership function, that is, the membership function is given to the set in the form of a table of values. Therefore, each node of the received tree contains information about the stored element of the set and the value of the membership function. In order to use the resulting class in the future as a container, an additional iterator class was created, based on a red-black tree node.

The resulting container was used in a class that describes the actual data type «set». For this class, the main methods and interfaces were implemented: insertion, deletion, searching for an element by an available key, searching for the smallest/largest, passing the container using an iterator.

Based on the accepted constraint on the finiteness of the set, we developed classes for working with fuzzy elements (Fig. 2). In particular, we carried out the differentiation of fuzzy sets into fuzzy sets themselves and fuzzy numbers, which ensured the flexibility of the library.

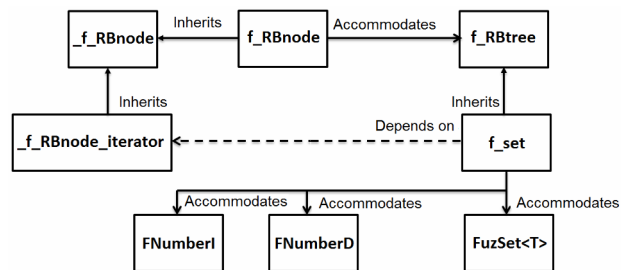


Fig. 2. Diagram of library classes

Fuzzy numbers provide work with interval arithmetic and can be used in private calculations. They are rigidly typed, which greatly facilitates the calculations. The class of the fuzzy set itself is written using template technology, which makes it possible not to tie to the data type, and provides code portability. The library has a modular structure, therefore the user can use only the part necessary to him, even the base class of the data structure «set» is available separately.

Fig. 2 provides a simplified diagram of classes that demonstrates the relationship in the library. The description of classes is given in Table. 1.

Table 1

The description of library classes

Class	Description
f_RBnode	Class-implementation of a red-black tree node
f_RBnode	Class-interface to the node of red-black tree
f_RBtree	Red-black tree
f_RBnode_iterator	Iterator for moving on red-black tree
f_set	Set
FNumberI	Fuzzy number on the set of natural numbers
FNumberD	Fuzzy number on the set of real numbers
FuzSet<T>	Class-template of fuzzy set

Table 2

Module structure of the library

Module	Content
Red-black tree	Classes f RBnode, f RBnode, f RBtree
Set	Module of red-black tree and classes f RBnode iterator, f set
Standard functions	A set of mathematical functions and text formatting functions to ensure library independence
Fuzzy integer number	Modules of tree, set, standard functions and class FNumberI
Fuzzy real number	Modules of tree, set, standard functions and class FNumberD
Operations on a fuzzy set	A set of functions that provide logical operations (intersection, union, etc.), as well as the choice of various t-norms for these operations
Fuzzy set	Modules of tree, set, standard functions, operations and class FuzSet<T>

```

#pragma once
#include "targetver.h"
#include <stdio.h>
#include <tchar.h>
#include <iostream>

#include "FNumberI.h"
using namespace fuz;

int _tmain(int argc, _TCHAR* argv[])
{
    int mas[3] = { 0, 1, 2 };
    //Создаём массив значений элементов нечёткого числа.
    double mmas[3] = { 0.2, 1, 0.2 };
    //Создаём массив значений принадлежности элементов нечёткого числа.
    FNumberI num1("Number1", mas, mmas, 3);
    //Инициализируем нечёткие числа.
    FNumberI num2("Number2", mas, mmas, 3);
    std::cout << num1.ToString() << "\n";
    num1 += num2;
    //Суммируем числа и заносим результат в первое число
    std::cout << num1.ToString() << "\n";
    std::cout << FUnion(&num1, &num2).ToString() << "\n";
    //Выводим результат объединения чисел.
    std::cout << FIntersection(&num1, &num2).ToString() << "\n";
    //Выводим результат перечесей чисел.
    std::cout << "First number " << num1.Defuzzy() << "\tSecond number " << num2.Defuzzy() << "\n";
    //Проводим дефаззификацию чисел.
    return 0;
}

```

Fig. 3. An example of a simple program using a library

At the same time, the library in addition to the above classes also contains separate modules of functions for working with these classes. An approximate structure of the modules is given in Table. 2.

Concerning fuzzy logic in the library (Fig. 3), we implemented:

- classes of fuzzy numbers and a fuzzy set itself;
- basic characteristics of fuzzy sets (height, mode, carrier, alpha-level, core, norm);
- the choice of several t-norms for fuzzy operations (min / max, algebraic, boundary, drastic);
- logical operations (union, intersection, complement, equality, difference, symmetric difference, disjunctive sum);
- algebraic operations on fuzzy numbers;
- algebraic actions on fuzzy sets (concentration, extension, exponentiation, multiplication by number, combination);
- operator of increasing fuzziness;
- defuzzification of fuzzy number.

All theoretical information for the realization of the fuzzy set functional is given in [2–4,10].

To fully comply with the requirements set for the library, the following steps are necessary to

develop the software:

- add of fuzzy relationships and operations over them;
- add of a linguistic variable, term sets, operations on term sets;
- add of a fuzzy output with a choice of output algorithm;
- add of defuzzification of fuzzy set;
- add of infinite fuzzy sets with a given membership function;
- add of a set of standard membership functions;
- porting the library to Unix/Linux and MacOS systems;
- add of top of the framework library as a separate customizable design tool for fuzzy systems with a graphical interface.

Conclusions

As a result of the work, a library for working with fuzzy sets was designed and implemented. The resulting software tool can be integrated into virtually any fuzzy control system being developed and at the same time makes it possible to perform both small fuzzy calculations and participate in system design.

REFERENCES

1. *Reznik L.* Fuzzy Controllers. – Oxford: Newnes, 1997. – 287 p.
2. *Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю.* Нечёткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 201 с.
3. *Леоненков А.А.* Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
4. *Штовба С.Д.* Введение в теорию нечётких множеств и нечёткую логику: Монография. – Винница: Континент-Прим, 2003. – 198 с.
5. *HyperLogic Corporation* official site [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – Электронные данные: Escondido, USA, 2008 – 2016. – Режим доступа: www.hyperlogic.com (дата обращения 08.10.2016). – Название с экрана.
6. *Бочарников В.П.* Fuzzy-технология: Математические основы. Практика моделирования в экономике. – Санкт-Петербург: «Наука» РАН, 2001. – 328 с.
7. *Brainema* [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – Электронные данные: 20011 – 2016. – Запись от 08.04.2013 – Режим доступа: www.brainema.ru/2013/04/fuzzy-logic-programs.html (дата обращения 08.10.2016). – Название с экрана.
8. *CyberGuru* [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – Электронные данные: 2006–2014. – Режим доступа: www.cyberguru.ru/algorithms/algorithms-theory/algorithms-fuzzy-logic-system.html (дата обращения 08.10.2016). – Название с экрана.
9. *Алгоритмы: построение и анализ*, 3-е изд. : Пер. с англ. / Томас Кормен, Чарльз Лейзерон, Рональд Ривест, Клиффорд Штайн. – М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2013. – 1328 с.
10. *Заде Л.* Нечёткая логика: Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближённых решений. – М.: Мир, 1976. – 167 с.

Поступила в редакцию 12.10.2016

ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ НЕЧІТКОГО УПРАВЛІННЯ І ПРОВЕДЕННЯ НЕЧІТКО-МНОЖИННИХ РОЗРАХУНКІВ

Зеленцов Д.Г., Науменко Н.Ю., Горбонос П.О.

В роботі пропонується опис концепції проектування і способи реалізації бібліотеки для роботи з даними, що мають нечіткий характер. На підставі огляду останніх досліджень в області нечітких обчислень сформульовані основні вимоги, що пред'являються до програмних засобів для проведення нечітко-множинних розрахунків. Метою роботи є розробка програмного засобу, реалізованого у вигляді модульної бібліотеки, яка задовольняє вимогам універсальності, інтегрованості, швидкодії, переносимості, повноти та незалежності. Для забезпечення гнучкості роботи бібліотеки проведена диференціація нечітких даних на власне нечіткі множини і на нечіткі числа. Представлена реалізація багаточислової бібліотеки для роботи з нечіткими даними. Пропонується опис основних етапів проектування програмного засобу, інструменту їх створення і структури модулів бібліотеки. Наводиться діаграма класів, що демонструє взаємозв'язки в бібліотеці, і опис модулів функцій для роботи з цими класами. Розроблений програмний засіб може бути інтегрован в уже існуючу або проектувану систему управління.

Ключові слова: нечітка множина, нечітка система управління, бібліотека.

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ НЕЧЁТКОГО УПРАВЛЕНИЯ И ПРОВЕДЕНИЯ НЕЧЁТКО-МНОЖЕСТВЕННЫХ РАСЧЁТОВ

Зеленцов Д.Г., Науменко Н.Ю., Горбонос П.А.

В работе предлагается описание концепции проектирования и способы реализации библиотеки для работы с данными, имеющими нечёткий характер. На основании обзора последних исследований в области нечётких вычислений сформулированы основные требования, предъявляемые к программным средствам для проведения нечётко-множественных расчётов. Целью работы является разработка программного средства, реализованного в виде модульной библиотеки, которая удовлетворяет требованиям универсальности, интегрируемости, быстродействия, переносимости, полноты и независимости. Для обеспечения гибкости работы библиотеки проведена дифференциация нечётких данных на собственно нечёткие множества и на нечёткие числа. Представлена реализация многоцелевой библиотеки для работы с нечёткими данными. Предлагается описание основных этапов проектирования программного средства, инструмента их создания и структуры модулей библиотеки. Приводится диаграмма классов, демонстрирующая взаимосвязи в библиотеке, и описание модулей функций для работы с этими классами. Разработанное программное средство может быть интегрировано в уже существующую или проектируемую систему управления.

Ключевые слова: нечёткое множество, нечёткая система управления, библиотека.

УДК 661.683

*Малявский Н.И.^а, Журавлева О.И.^б***МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА РЕОЛОГИЧЕСКОЙ АНОМАЛИИ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ АМИНОСИЛИКАТОВ**^а Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. - Москва^б ГВУЗ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ», г. ДНЕПР

В работе предлагается простая математическая модель взаимосвязанных кислотно-основных и поликонденсационных равновесий в водных растворах аминосиликатов (полисиликатов алифатических аминов, аминоспиртов и других аминосоединений). Целью работы являлось описание эффекта реологической аномалии, заключающейся в обратимом росте вязкости раствора при повышении температуры. Предлагаемая расчетная модель предполагает прямую зависимость вязкости раствора от степени полимеризации силикатных анионов, а также независимость константы диссоциации силанольных групп и константы равновесия процесса поликонденсации от степени полимеризации. На основе принятых допущений была построена и решена система из восьми линейных и нелинейных уравнений. Результаты вычислений, выполненных для концентрированных растворов силикатов аминов (метиламин, диэтиламин, пиперидин, моноэтаноламин), а также натрия, подтверждают наличие положительной температурной зависимости степени полимеризации силикатных анионов в растворах аминосиликатов, в отличие от растворов силикатов сильных оснований. Таким образом, предлагаемая математическая модель полимеризационно-гидролизных равновесий в водных растворах силикатов качественно объясняет существование реологической аномалии в водных растворах аминосиликатов и ее отсутствие в растворах щелочных силикатов и силикатов четырехзамещенных аммониевых оснований. Кроме того, она правильно воспроизводит смещение молекулярно-массового распределения силикатных анионов при изменении химического состава и концентрации растворов.

Ключевые слова: алифатические амины, аминосиликаты, реологические свойства, вязкость, поликонденсация, расчетная модель.

Постановка проблемы

Растворы аминосиликатов (АС) представляют собой водные растворы полисиликатов алифатических аминов (а также аминоспиртов и других аминосоединений), получаемые методом ионного обмена либо прямым растворением твердой кремнекислоты или аэросила в водных растворах аминосоединений с достаточно высокой величиной константы основности амина- или иминогруппы ($pK_b < 4,5$). Свойства таких растворов в значительной степени определяются двумя взаимосвязанными равновесиями, а именно, равновесием ионизации амина и равновесием поликонденсации кремнекислородных анионов (ККА), результирующие значения pH и параметров молекулярно-массового распре-

деления (ММР) анионов определяются типом амина, его

концентрацией и концентрацией SiO_2 , а также температурой. Наиболее интересным свойством водных растворов АС является то, что все достаточно концентрированные по кремнезему растворы проявляют эффект реологической аномалии, заключающийся в обратимом повышении вязкости раствора с ростом температуры. Хотя с момента открытия эффекта реологической аномалии в растворах АС прошло более 20 лет, физико-химический механизм явления до сих пор нельзя считать окончательно установленным.

Анализ последних исследований и публикаций
Впервые об эффекте реологической ано-

малии в растворах АС было сообщено в 1994 г. [1], причем сразу же было отмечено и в последующих работах подтверждено, что загустевание растворов при нагревании сопровождается повышением средней степени полимеризации ККА [2–3]. Внешне сходный эффект наблюдается и в других силикатных системах (растворы полисиликатов лития [4] и тетраамин-цинка [5]), а также в нескольких несиликатных системах, однако в этих случаях аномалия имеет совершенно другой механизм, не связанный с полимеризацией ионов [6].

В табл. 1 перечислены в хронологическом порядке описания важнейших жидких систем, проявляющих реологическую аномалию. Следует отметить, что, несмотря на отсутствие достаточно надежного теоретического обоснования эффекта в какой-либо из проявляющих его систем, само явление получило практическое применение, в частности, при отливке керамических гелей с помощью метилцеллюлозы в качестве загустителя [7–8].

Растворы силикатов других сильных оснований (щелочных металлов, кроме лития, и четырехзамещенных аммониевых оснований), а также боратов АС, не проявляют реологической аномалии. В качестве примера, на рис. 1 показаны зависимости десятичного логарифма динамической вязкости ($\lg \eta$, мПа·с.) от температуры для нескольких силикатных и боратных растворов, проявляющих и не проявляющих реологическую аномалию.

Формулирование цели исследования

Целью настоящей работы являлась разработка простой математической модели взаимосвязанных кислотно-основных и поликонденсационных равновесий в растворах АС, которая

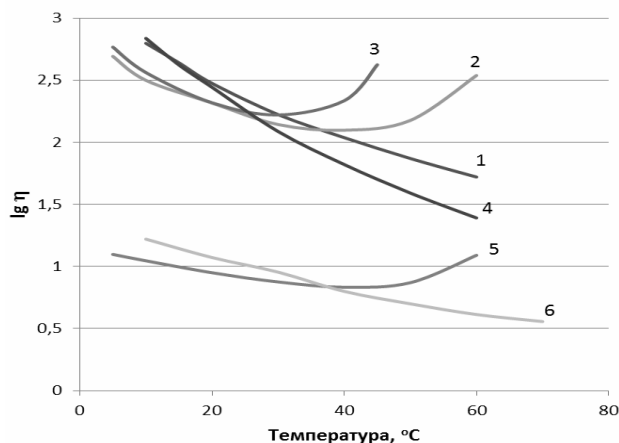


Рис. 1. Температурная зависимость $\lg \eta$ для водных растворов силикатов (в скобках – молярный модуль): 1 – натрия (2,9); 2 – лития (3,0); 3 – пиперидина (2,8); 4 – диэтил-бис-гидроксипропиламмония (1,5); 5 – этаноламина (0,57); 6 – водного раствора бората этаноламина (1,3)

позволила бы объяснить возникновение реологической аномалии за счет поликонденсационного фактора, а именно, прямой зависимости средней степени полимеризации ККА от температуры.

Такой подход дает возможность уточнить механизм явления, выяснить роль в его возникновении различных термодинамических факторов и, как следствие, проводить более осмысленный поиск новых силикатных и несиликатных систем с такой же аномалией.

Изложение основного материала исследования

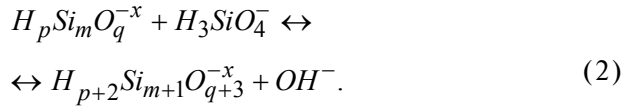
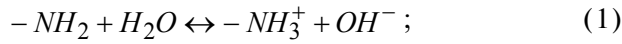
Свойства растворов АС в значительной степени определяются двумя взаимосвязанными

Таблица 1

Известные к настоящему времени системы с реологической аномалией

Система	Год открытия и авторы	Механизм аномалии
Водные растворы силикатов лития	1907 (J.M. Ordway)	Обратная температурная зависимость растворимости силикатов лития в воде
Метилцеллюлоза (водные растворы)	1935 (E. Heymann)	Усиление гидрофобного взаимодействия полимерных цепей из-за уменьшения степени гидратации метокси-групп с ростом температуры
Жидкая сера	1943 (R.F. Bacon, R. Fanelli)	Обратимая полимеризация при нагревании до 159 ⁰ С
Водные растворы сополимеров (на основе полиалкиленгликолей, N-замещенных полиакриламидов, полифосфазенов и др.)	1972 (I. Schmolka)	Мицеллярная агрегация, вызываемая усилением гидрофобного взаимодействия из-за уменьшения степени гидратации полярных групп с ростом температуры
Водные растворы аминосиликатов	1994 (Н.И. Малявский с сотр.)	Повышение степени полимеризации ККА с ростом температуры

равновесиями: равновесием ионизации амина и равновесием поликонденсации силикатных анионов:



Чем выше величина константы основности амина (K_b), тем сильнее равновесие (1) смещено вправо, а равновесие (2) – влево, в сторону менее полимеризованных ККА. Повышение общей концентрации SiO_2 в растворе, наоборот, смещает равновесие (2) вправо. Предлагаемая расчетная модель базируется на следующих предположениях:

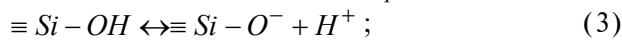
– растворы аминосиликатов, как и силикатов щелочных металлов, имеют равновесный характер;

– динамическая вязкость растворов силикатов связана прямой зависимостью со средней степенью полимеризации ККА;

– величины константы диссоциации силанольных групп ККА и константы равновесия процесса поликонденсации ККА не зависят от типа аниона и его степени полимеризации.

Из этих предположений первые два основаны на всей совокупности результатов исследований растворов аминосиликатов, а третье является вполне допустимым упрощением, значительно облегчающим расчет и не изменяющим качественно его результаты.

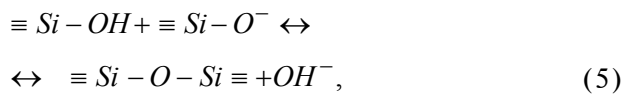
Тогда имеется три химических равновесия, определяющие ионный состав раствора, с константами, соответственно, диссоциации силанольной связи (K_a), протонизации амина (K_b) и поликонденсации ККА (K_p):



$$K_a = \frac{[\equiv Si - O^-] \times [H^+]}{[\equiv Si - OH]} ; \quad (3a)$$



$$K_b = \frac{[R - NH_3^+] \times [OH^-]}{[R - NH_2]} ; \quad (4a)$$



$$K_p = \frac{[\equiv Si - O - Si \equiv] \times [OH^-]}{[\equiv Si - OH] \times [\equiv Si - O^-]} . \quad (5a)$$

Из соображений стехиометрии имеем еще три зависимости:

$$4C_{SiO_2} = [\equiv Si - OH] + [\equiv Si - O^-] + 2[\equiv Si - O - Si \equiv] , \quad (6)$$

$$C_{RNH_2} = [R - NH_3^+] + [R - NH_2] ; \quad (7)$$

$$[\equiv Si - O^-] + [OH^-] = [R - NH_3^+] , \quad (8)$$

где C_{SiO_2} и C_{RNH_2} обозначают общие молярные концентрации кремнезема и амина в растворе. При этом в последнем уравнении допустимо пренебречь концентрацией катионов водорода, учитывая существенно щелочную среду в растворах силикатов практически важных концентраций ($pH=10,5-12,5$).

Для оценки степени «заполимеризованности» ККА здесь используется основность x (молярное отношение H_2O/SiO_2 в молекуле соответствующей кремнекислоты), наиболее удобная для характеристики сильно заполимеризованных силикатов и связанная с более часто используемой величиной связности ККА (Q) соотношением $Q = 4 - 2x$. Величина основности ККА выражается через используемые здесь параметры системы следующим образом:

$$x = 2 - [\equiv Si - O - Si \equiv] / C_{SiO_2} . \quad (9)$$

Также имеет место еще одна взаимосвязь концентраций – ионное произведение воды:

$$K_w = [H^+] \times [OH^-] . \quad (10)$$

Таким образом, получена система из восьми уравнений (3а, 4а, 5а и 6–10), четыре из которых нелинейные. Эта модель может быть использована и для расчета равновесий в растворах щелочных силикатов и силикатов четырехзамещенных аммониевых оснований – при использовании предположения о полной ионизации катиона (равновесие (4) целиком сдвинуто вправо).

С учетом подстановок решение системы сводится к решению следующего уравнения:

$$QF + \frac{QK_w}{K_a} - 2x\sqrt{C_{SiO_2}} = 0 , \quad (11)$$

где значения параметров Q и F , соответственно, равны:

$$Q = \sqrt{\frac{(2-x)K_a}{K_p K_w}};$$

$$F = \frac{K_b}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4C_{RNH_2}}{K_b(1+Q)\sqrt{C_{SiO_2}}}} - 1 \right).$$

Решение уравнения (11) относительно x при различных значениях общих концентраций амина и кремнезема проводилось численно методом половинного деления. Решение облегчается тем, что в единственном имеющем физический смысл интервале основностей $0 \leq x \leq 2$ уравнение всегда имеет решение и притом единственное. Для стандартной температуры 298 К использовались общепринятые значения показателей констант: $pK_w = 14,0$; $pK_a = 9,8$ [4]; $pK_p = 0,86$ [4], а величины pK_b аминов были взяты из монографии Дж. Леффлера и Е. Грунвальда [9]. Для растворов щелочных силикатов использовалась условная величина $pK_b = -3$, практически полностью исключающая возможность гидролиза по катиону.

Результаты вычислений, выполненных для концентрированных растворов силикатов аминов (метиламин, диэтиламин, пиперидин, этаноламин и др.) и натрия, дают вполне разумные, хотя и несколько заниженные, величины среднемассовой основности ККА (x). Так, для 10–20%-ных по кремнезему растворов с силикатным модулями 2–3 получены значения, лежащие в интервалах 0,1–0,3 (аминосиликаты) и 0,3–0,5 (силикаты натрия). Последний интервал находится в полуколичественном согласии с большинством экспериментальных данных ($x=0,5-0,6$), определяемых с помощью ММР на ядрах Si-29. Кроме того, хорошо воспроизводятся известные зависимости величины x от параметров состава раствора (ее рост с увеличением

C_{RNH_2} при постоянной C_{SiO_2} и с уменьшением C_{SiO_2} при постоянной C_{RNH_2} , а также с уменьшением pK_b амина). Воспроизводится также менее тривиальная зависимость, а именно, существенный рост величины x с уменьшением концентрации раствора для аминосиликатов и весьма слабая зависимость (или даже некоторое уменьшение x [4]) для щелочных силикатов.

Были выполнены расчеты температурной

зависимости x для обоих типов силикатных растворов. Величины pK_b аминов для температур от 0° до +60°С определены по литературным данным [9] (для щелочных силикатов изменения использованной в расчетах условной величины pK_b не влияют на результаты расчета). Для вычисления pK_a и pK_p , в связи с отсутствием достоверных данных, использованы наборы значений энтальпий диссоциации и полимеризации внутри некоторых имеющих физический смысл интервалов. Характерные примеры результатов вычислений приведены в таблице 2 (51,4 кДж/моль – крайняя верхняя оценка величины ΔH_a – и –8,3 кДж/моль – крайняя нижняя оценка величины ΔH_p – вычислены по данным, приведенным в монографии Р. Айлера [4]).

Как следует из представленных в таблице результатов, для растворов силиката метиламина во всех случаях, кроме одного (№ 6), получено повышение степени полимеризации (или, что то же самое, понижение средней основности ККА) с ростом температуры. Аналогичные результаты получены для силикатов других аминосоединений. В то же время, для растворов силикатов сильных оснований, таких, как силикат натрия, во всех случаях, кроме одного (№ 6), наблюдается обратная зависимость – понижение степени полимеризации (повышение основности ККА) с ростом температуры.

Полученные результаты по смещению ММР согласуются с различной крутизной расчетных кривых зависимости pH от температуры – для растворов АС скорость снижения pH с ростом температуры значительно выше, чем для растворов щелочных силикатов. В качестве примера, на рис. 2 показаны температурные зависимости x и для растворов силикатов натрия и метиламина с одинаковыми модулями и концентрацией кремнезема, рассчитанные при одинаковых наборах энтальпийных переменных.

Расчет показывает, что, вопреки первоначальному предположению [2–3], реологическая аномалия не связана непосредственно с тепловым эффектом протонизации амина: полимеризация аминосиликата при нагревании раствора имеет место при всех комбинациях исходных параметров, кроме одного (№ 6), в том числе и для случая с нулевыми значениями всех трех энтальпий (№ 1). Представляется, что определяющую роль в ее возникновении играют три фактора: а) увеличение с ростом температуры, б) невысокая, в сравнении с процессом ионизации воды (55,8 кДж/моль), или нулевая эндотермичность реакции диссоциации силанольной

Таблица 2

Величины средней основности ККА в растворах силикатов метиламина и натрия с массовой долей 10%, вычисленные для трех температур при различных значениях вводных параметров

№ п/п	Энтальпия, кДж/моль			$(CH_3NH_3)_2O \cdot 2,8SiO_2$			$Na_2O \cdot 2,8SiO_2$		
	ΔH_a	ΔH_b	ΔH_p	$0^{\circ}C$	$25^{\circ}C$	$60^{\circ}C$	$0^{\circ}C$	$25^{\circ}C$	$60^{\circ}C$
1	0	0	0	0,194	0,141	0,117	0,360	0,366	0,389
2	0	0,8	0	0,192	0,141	0,118	0,360	0,366	0,389
3	0	0,8	-8,3	0,182	0,141	0,131	0,360	0,366	0,394
4	0	0,8	10	0,203	0,141	0,104	0,361	0,366	0,380
5	25	0,8	-8,3	0,158	0,141	0,136	0,361	0,366	0,378
6	51,4	0,8	-8,3	0,136	0,141	0,153	0,363	0,366	0,369
7	51,4	0,8	0	0,145	0,141	0,141	0,365	0,366	0,366
8	51,4	0,8	10	0,157	0,141	0,128	0,367	0,366	0,364

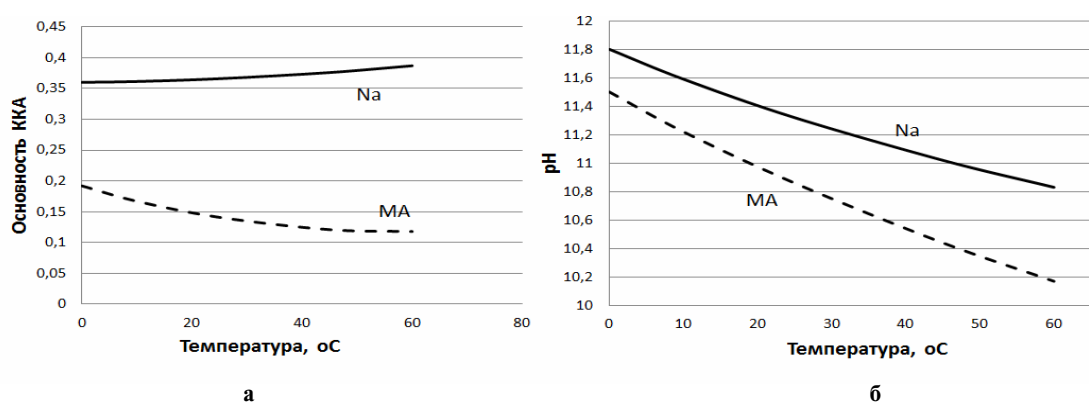


Рис. 2. Рассчитанные температурные зависимости средней основности ККА (а) и величины pH (б) для растворов силикатов натрия и метиламина (МА) с молярными модулями 2,8 и массовой долей SiO_2 10% (набор энтальпий соответствует № 2 в табл. 2)

группы и в) нулевой или положительный тепловой эффект реакции поликонденсации ККА, в оптимальном – сочетание последних двух факторов (№ 4).

При этом с ростом температуры концентрация гидроксид-ионов увеличивается, главным образом, вследствие усиления процесса диссоциации воды.

То же относится и к температурной зависимости величины $[OH^-]$ в растворе силиката натрия, но там наблюдается, наоборот, деполимеризация ККА при нагревании, хотя и весьма слабая.

Такой результат можно объяснить изменением вида первого члена внутри скобок в уравнении (11): при больших значениях K_b он перестает зависеть от K_w , а следовательно, и от температуры, и температурную зависимость величины x определяет второй член внутри скобок, обеспечивающий положительную температурную зависимость величины основности ККА.

Выводы

Таким образом, предлагаемая математическая модель полимеризационно-гидролизных равновесий в водных растворах силикатов качественно объясняет существование реологической аномалии в рассматриваемых растворах и ее отсутствие в растворах щелочных силикатов и силикатов четырехзамещенных аммониевых оснований. Кроме того, она правильно воспроизводит и позволяет анализировать смещения ММР ККА при изменении химического состава и концентрации растворов.

Некоторые другие экспериментально наблюдаемые в растворах силикатов эффекты предложенная модель не объясняет, во всяком случае, на существующем уровне ее сложности. К числу таких эффектов относятся, например, немонотонная зависимость основности ККА от концентрации амина при постоянной концентрации кремнезема, величина $x = 1$ в насыщенных водных растворах кремнезема, а самое главное – наличие реологической аномалии в ра-

створах полисиликатов лития. Есть основания надеяться, что впоследствии эти эффекты также смогут быть качественно воспроизведены на основе предлагаемой модели при условии ее некоторого усложнения, в частности, введения учета коэффициентов активности ионов, ограниченной растворимости силикатов в воде, а также зависимости константы ионизации силанольной группы от степени полимеризации ККА.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Maliavski N., Tchekounova E., Dushkin O.* Silica fibers obtained from aminosilicate solutions with a reversible spinnability // *J. of Sol-Gel Sci. and Technol.* – 1994. – Vol. 2. – P.503-506.
2. *Малявський Н.И., Великанова Н.В.* Реологическая аномалия в растворах аминосиликатов: механизм и практические применения // *Вестник МГСУ, 2010.* – № 4 (3). – С.111-116.
3. *Малявський Н.И., Душкин О.В.* Некоторые закономерности существования реологической аномалии в водных растворах силикатов // *Вестник МГСУ, 2011.* – № 4. – С.163-168.
4. *Айлер Р.К.* Химия кремнезема: пер с англ. Л.Т. Журавлева, под ред. В.П. Прянишникова. – М.: Мир, 1982. – Ч.1. – 416 с.
5. *Toutorski I.A., Tkachenko T.E., Maliavski N.I.* Structural and chemical modification of polydiene latexes by gel derived silica // *J. Sol-Gel Sci. and Technol.* – 1998. – Vol. 13. – P.1057-1060.
6. *Малявський Н.И., Покидько Б.В.* Поликонденсационные равновесия и реологическая аномалия в водных растворах силикатов // *Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая.* – 2013. – Вып. 4(29). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/ attachments/ MalyavskiyPokidko-2013_4\(29\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/MalyavskiyPokidko-2013_4(29).pdf).
7. *Colloidal Shaping of Alumina Ceramics by Thermally Induced Gelation of Methylcellulose / Saraswathy Hareesh U.N., Anantharaju R., Biswas P., Rajeswari K., Johnson Roy* // *Journal of the American Ceramic Society.* – 2011. – Vol. 94. – P.749-753.
8. *Diametral deformation behavior and machinability of methyl cellulose thermal gel cast processed alumina ceramics / Biswas P., Swathi M., Ramavath P., Rajeswari K., Buchi Suresh M., Johnson Roy.* // *Ceramics International, 2012.* – Vol. 38. – P.6115-6121.
9. *Leffler J. E., Grunwald E.* Rates and equilibria of organic reactions. – N.Y.: John Wiley & Sons, 1963. – 474 p.

Поступила в редакцию 14.10.2016

Рецензент: академик РАЕН, д.т.н., проф. Покровская Е.Н.

МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТУ РЕОЛОГІЧНОЇ АНОМАЛІЇ У ВОДНИХ РОЗЧИНАХ АМІНОСИЛІКАТІВ

Малявський М.І., Журавльова О.І.

В роботі пропонується проста математична модель

взаємопов'язаних кислотно-основних і поліконденсаційних рівноваг у водних розчинах аминосиликатів (полісиликатів аліфатичних амінів, аміноспиртів та інших аміносполук). Метою роботи був опис ефекту реологічної аномалії, яка полягає в оборотному зростанні в'язкості розчину при підвищенні температури. Розрахункова модель, що пропонується, передбачає пряму залежність в'язкості розчину від ступеня полімеризації силікатних аніонів, а також незалежність константи дисоціації силанольних груп і константи рівноваги процесу поліконденсації від ступеня полімеризації. На основі прийнятих припущень була побудована і розв'язана система з восьми лінійних та нелінійних рівнянь. Результати обчислень, виконаних для концентрованих розчинів силікатів амінів (метиламін, діетиламін, піперидин, моноетаноламін), а також натрію, підтверджують наявність позитивної температурної залежності ступеня полімеризації силікатних аніонів в розчинах аминосиликатів, на відміну від розчинів силікатів сильних основ. Таким чином, запропонована математична модель полімеризаційно-гідролітичних рівноваг у водних розчинах силікатів якісно пояснює існування реологічної аномалії у водних розчинах аминосиликатів і її відсутність у розчинах лужних силікатів і силікатів чотирьохзаміщених амонієвих основ. Крім того, вона правильно відтворює зміщення молекулярно-масового розподілу силікатних аніонів при зміні хімічного складу і концентрації розчинів.

Ключові слова: аліфатичні аміни, аминосиликати, реологічні властивості, в'язкість, поліконденсація, розрахункова модель.

MODELING A RHEOLOGICAL ANOMALY IN AQUEOUS AMINOSILICATE SOLUTIONS

Maliavski N.I., Zhuravlova O.I.

A simple mathematical model of interrelated acid-base and polycondensation equilibria in aqueous solutions of aminosilicates (polysilicates of aliphatic amines, amino alcohols and other amino compounds) is proposed. The objective of the work was to describe the effect of a rheological anomaly consisting in a reversible increase in solution viscosity with increasing temperature. The proposed calculation model assumes a direct dependence of the solution viscosity on the polymerization degree of silicate anions, as well as the independence of the dissociation constant of silanols and the polycondensation equilibrium constant on the degree of polymerization. Based on the assumptions made, a system of eight linear and nonlinear equations was constructed and solved. The results of calculations performed for concentrated solutions of aminosilicates (methylamine, diethylamine, piperidine and monoethanolamine silicates), as well as sodium silicate, confirm the presence of a positive temperature dependence of the polymerization degree of silicate anions in aminosilicate solutions, in contrast to solutions of silicates of strong bases. Thus, the proposed mathematical model of polymerization-hydrolysis equilibria in aqueous silicate solutions qualitatively explains the existence of the rheological anomaly in aqueous solutions of aminosilicates and its absence in solutions of alkali silicates and silicates of quaternary ammonium bases. In addition, it correctly reproduces displacements of the molecular mass distribution of silicate anions with changes in chemical composition and concentration of solutions.

Keywords: aliphatic amines, aminosilicates, water glass, rheological properties, viscosity, polycondensation, calculation model.

УДК 669.162.21-52:007:159.955

*Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Белькова А.И.,
Белошанка Е.А.*

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ДОМЕННОЙ ПЛАВКОЙ

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, г. Днепр

Представлены функциональные и алгоритмические особенности разработанной в Институте черной металлургии интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой. Идеология построения интеллектуальной системы основана на диагностике и принятии решений по управлению процессом плавки на основе расчета комплексных критериев оценки процессов, что отличает ее от известных модельных систем. В комплексных критериях объединены технологические параметры и выходные данные систем автоматизированного контроля процессов. Предложены и реализованы в системе два методических подхода к созданию комплексных показателей, на основе которых разработаны критерии оценки: теплового состояния доменной плавки, газодинамического режима, формы и положения пластичной зоны, эффективности осевой коксовой отдушины, воздействия расплавов на футеровку металлоприемника и интегрального показателя доменной шихты. Показано, что основными структурными комплексами системы являются: контрольно-измерительный (база данных); база знаний; расчетный; модельный; диагностический, формирования рекомендаций по управлению доменной плавкой. Выполнена адаптация разработанной интеллектуальной системы к технологическим условиям работы ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Обоснован выбор базовых режимов работы печи и опытных периодов для апробации системы. Рассчитаны значения критериев оценки процессов плавки и определены оптимальные диапазоны изменения. Выполнена диагностика хода печи в исследуемых периодах ее работы и разработаны рекомендации по управлению процессом плавки.

Ключевые слова: доменная плавка, критерии оценки процессов, функционально-алгоритмическая структура интеллектуальной системы.

Постановка проблемы

Доменная плавка, представляющая собой совокупность физико-химических превращений и механических процессов, происходящих в доменной печи, является сложным с точки зрения управления объектом. Эффективность управляющих воздействий на ход процессов в печи определяется квалификационным уровнем операторов, для поддержки принятия которыми конкретных решений по управлению ходом печи в последние годы разработаны и реализованы информационно-моделирующие системы (экспертные системы).

Формулирование цели исследования

Целью выполненных исследований являлась разработка первой отечественной интеллек-

туальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой.

Анализ последних исследований и публикаций

Применяемые в настоящее время экспертные системы отличаются набором выполняемых функций, уровнем технического, математического и информационного обеспечения, а также иерархической структурой [1–2]. Наибольших успехов в разработке и реализации экспертных систем добились за рубежом. В частности, к наиболее известным можно отнести экспертные системы, разработанные фирмами Siemens VAI (Германия, Австрия) и Sollac (Франция). Как показал опыт использования таких систем, они плохо адаптируются к условиям украинских предприятий. Кроме того, эти системы являют-

ся модельными и используют информацию автоматизированных систем для настройки и адаптации математических моделей, на основе которых функционируют экспертные системы.

Изложение основного материала исследования

Основой для создания в Институте черной металлургии НАН Украины первой отечественной экспертной системы по управлению процессом плавки явились разработанные в течение последних двух десятилетий современные системы автоматизированного контроля процессов плавки, которые в наиболее полном объеме установлены на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» [3].

Идеология построения интеллектуальной системы основана на диагностике и принятии решений по управлению процессом плавки на основе расчета комплексных критериев оценки процессов, что отличает ее от известных модельных систем. В комплексных критериях объединены технологические параметры и выходные данные систем автоматизированного контроля процессов, что в значительной степени облегчит принятие операторами решений по управлению доменной плавкой. Создание таких комплексных критериев особо актуально в современных условиях ведения доменной плавки, характеризующихся ухудшением свойств шихтовых материалов и непостоянством их состава, использованием значительного количества вторичных ресурсов и отсеваемых фракций, а также различных углеродсодержащих добавок, в том числе, пылеугольного топлива.

Предложены и реализованы в системе два методических подхода к созданию комплексных критериев. Согласно первому подходу процесс разработки критерия представлен двумя этапами – разработка показателя оценки процесса и преобразование показателя в критерий. Выбор параметров, которые могут быть использованы в качестве аргументов показателя процесса плавки, осуществлялся на основе анализа их корреляционных зависимостей от технологических параметров, принятых в качестве критериев оценки процессов. Для равнозначного влияния каждого из выделенных параметров на показатель принимается мультипликативная форма его представления (в виде произведения параметров). Каждый из входящих в показатель параметров принимается в качестве аргумента критерия. На первом этапе построения критерия выполняется процедура нормирования аргументов с учетом их нормального закона распре-

ления.

Следующим этапом предусматривается выполнение логит-преобразования каждого аргумента разрабатываемого критерия, в результате которого выходная величина приводится к диапазону 0...1.

В логит-регрессионной модели предсказанные значения зависимой переменной или переменной отклика не могут быть меньше (или равными) нулю, или больше (или равными) единице, не зависимо от значений независимых переменных. Поэтому, эта модель часто используется для анализа бинарных зависимых переменных или переменных отклика. Термин «логит» был впервые использован Джозефом Берксоном в 1944 г. [4]. Для выполнения логит-преобразования используется уравнение:

$$F(X_i) = \frac{1}{1 + e^{-X_i}}.$$

В результате преобразований критерий определяется как среднее геометрическое логит-преобразованных нормированных аргументов.

Второй подход к созданию критерия заключается в использовании обобщенной функции желательности Харрингтона, позволяющей разноразмерные показатели преобразовать в безразмерную шкалу желательности и «свернуть» их в единый обобщенный показатель, что дает возможность выполнить всестороннюю оценку объекта и повысить информационную мощность критерия оптимизации.

Первый подход применен для разработки критериев оценки: теплового состояния доменной плавки, газодинамического режима, эффективности осевой отдушины, воздействия расплавов на футеровку металлоприемника, а также оценки формы и положения пластичной зоны в доменной печи. Второй подход положен в основу создания интегрального показателя доменной шихты.

Представленная на рис. 1 функционально-алгоритмическая структура интеллектуальной системы позволяет проанализировать взаимодействие составных комплексов системы.

Система подразделена на структурные комплексы (подсистемы), которые в свою очередь состоят из отдельных блоков. Основными структурными комплексами являются: контрольно-измерительный (база данных); база знаний; расчетный; модельный; диагностический, формирования рекомендаций по управлению доменной плавкой. Контрольно-измерительный ком-

плекс – «База данных» (БД) является информационной моделью и отображает состояние процесса. Отличительной особенностью организации данных в БД является их интегрирование и обеспечение многопользовательского режима. Важной особенностью формирования баз данных разрабатываемой для условий ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» интеллектуальной системы поддержки принятия решений является объединение в единый комплекс традиционно контролируемых технологических параметров и расчетных показателей плавки, а также информации, поступающей от автоматизированных систем контроля доменной плавки: разгара футеровки горна и лещади («Разгар»), распределения дутья по фурмам («Фурма»), контроля и прогноза шлакового режима («Шлак»), информационной системы отображения информации радиолокационного профилемера [3].

База знаний. База знаний интеллектуальной системы содержит технологические признаки, на основе которых диагностируется ход печи, а также рекомендации, регламентированные Технологической инструкцией по ведению доменной плавки на конкретной доменной печи, и представленные последовательностью рекомендуемых действий. На основе этой информации, записанной в базе знаний, экспертная система в соответствии с конкретной обстановкой, диагностирует ход печи и генерирует решение о порядке выполнения операций (дей-

ствий) по его нормализации. Расчетная подсистема интегрирует в своем составе два блока:

1. Блок расчета критериев оценки процессов плавки, предназначенных для оценки: теплового состояния доменной плавки (K_t), газодинамического режима (K_{gd}), формы и положения пластичной зоны (K_{cz}), эффективности осевой коксовой отдушины (K_o), воздействия расплавов на футеровку металлоприемника (K_{sf}) и интегрального показателя доменной шихты ($K_{ш}$).

2. Блок расчета положения, конфигурации и толщины пластичной зоны. Расчет базируется на методе определения формы и положения пластичной зоны на основе показаний профилемера, в дополнение к которому, в случае отсутствия возможности получения исходной информации, может привлекаться математическая модель определения положения линии плавления и эффективной площади плавления. Определение с помощью математических моделей выгрузки шихтовых материалов из бункера БЗУ и радиального распределения шихты на колошнике компонентного состава материалов в зонах сечения колошника позволяет определить толщину пластичной зоны. Системная реализация этих подходов позволяет рассчитать критерий оценки пластичной зоны, а также определить ее форму, толщину и положение, т.е. ее основные параметры, в значительной степени определяющие изменения программ загрузки шихтовых материалов.

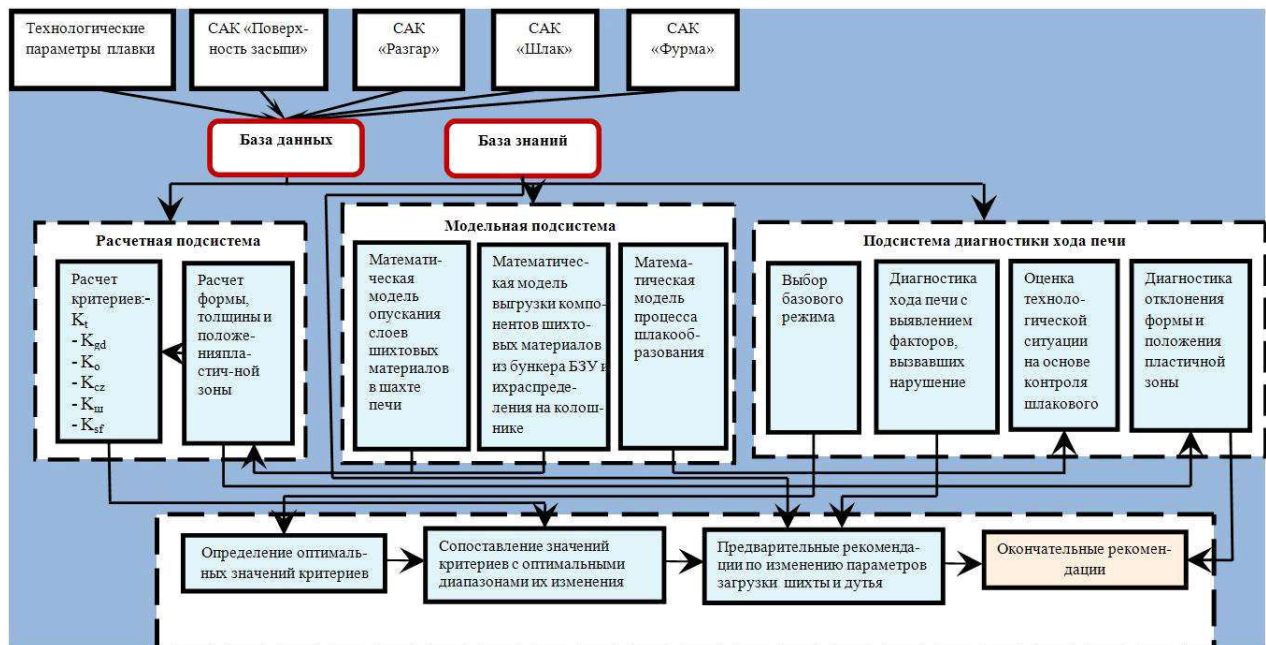


Рис. 1. Функционально-алгоритмическая структура интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой

Модельная подсистема состоит из трех блоков, каждый из которых представляет определенную функциональную математическую модель:

1. Математическая модель опускания слюев шихты, сформированных на колошнике, в шахте доменной печи. Результаты моделирования позволяют сформировать структуру пластичной зоны.

2. Модель, синтезированная на основе объединения двух моделей – выгрузки шихтовых материалов из бункера БЗУ и распределения материалов на колошнике, позволяющая определить распределение компонентов шихтовых материалов в зонах сечения колошника.

3. Математическая модель процесса шлакообразования.

Подсистема диагностики хода доменной печи. Функционирование подсистемы обеспечивается анализом поступающей из структурных комплексов информации. Подсистема представляет собой программный модуль, предназначенный для раннего обнаружения намечающихся расстройств доменной печи. Ход печи диагностируется, с одной стороны, на основе сопоставления значений рассчитанных критериев оценки процессов плавки с оптимальными диапазонами их изменения, с другой – на основе анализа когнитивных знаний, находящихся в Базе знаний системы. Для установления допустимого диапазона изменения критерия, обеспечивающего целевую функцию управления процессом плавки – минимизацию расхода кокса и требуемый уровень производства кондиционного чугуна, применен разработанный в ИЧМ метод многокритериальной оптимизации [5], основные аспекты которого сводятся к следующему. По накопленным эксплуатационным данным готовится исходная выборка в пространстве параметров в виде матрицы $\{A_{ij}\}$, прошедшей специальную экспертизу на корректность в подсистеме «Операции с данными» пакета прикладной статистики. Каждый из критериев рассматривается как поверхность – отклик в гиперпространстве параметров оптимизации. Суперпозиция таких поверхностей в выбранных координатных сечениях дает возможность сопоставить локальные оптимумы всех поверхностей одновременно и рационально выбрать параметры, удовлетворяющие указанным требованиям. Задача оптимизации сводится, таким образом, к построению необходимых математических моделей для точечных экспериментальных функций – откликов с последующей геометрической

интерпретацией в виде трехмерных картограмм.

В качестве примера, иллюстрирующего использование метода многокритериальной оптимизации для определения оптимального диапазона изменения одного из функционирующих в составе системы критериев, на рис. 2 приведена картограмма, полученная в результате совместного рассмотрения картограмм, отражающих, в частности, связь критерия теплового состояния плавки, содержания кремния, суммарного расхода топлива и производства чугуна.

На основе рассмотрения картограммы определяется оптимальный диапазон изменения критерия (на рисунке оптимальная область обозначена черным цветом).

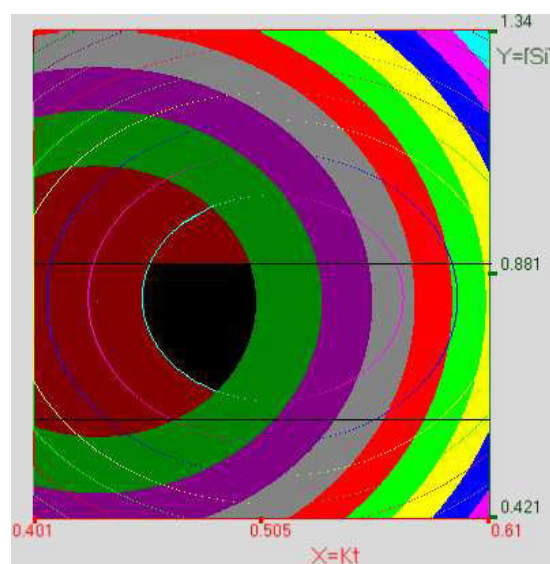


Рис. 2. Трехмерная диаграмма для определения оптимальных значений критерия оценки теплового состояния, соответствующих максимальной производительности печи и минимальному расходу суммарного топлива

Одним из блоков, входящих в состав подсистемы диагностики, является блок диагностики отклонения положения и формы пластичной зоны в доменной печи от их рациональных значений. Блок функционирует на основе данных о форме и положении пластичной зоны, поступающих от расчетной подсистемы.

Для оценки хода печи с помощью соответствующих критериев подсистема содержит блок выбора базового режима плавки.

Подсистема формирования рекомендаций по управлению доменной плавкой. Подсистема

объединяет два блока — генерации предварительных рекомендаций и формирования окончательных рекомендаций по управлению доменной плавкой. Формирование предварительных рекомендаций осуществляется по результатам диагностики хода печи на основе сопоставления значений рассчитанных критериев оценки процессов плавки с оптимальными диапазонами их изменения, а также рекомендаций, содержащихся в Базе знаний системы и применимых в зависимости от отклонений хода печи от нормального. Окончательные рекомендации являются результатом совместного анализа предварительных рекомендаций и выходных параметров блока диагностики отклонения формы и положения пластичной зоны от их рациональных значений.

Представление технологическому персоналу необходимой информации о ходе доменной плавки осуществляется с помощью подсистемы отображения информации. При этом поддерживаются два режима:

- автоматический (постоянный вывод информации на монитор компьютера);
- диалоговый (по запросу пользователя).

Подсистема также обеспечивает визуализацию промежуточных и конечных результатов функционирования структурных комплексов интеллектуальной системы, в том числе, предварительных и окончательно сформированных рекомендаций по изменению параметров загрузки шихтовых материалов либо параметров дутьевого режима плавки.

Целевыми функциями интеллектуальной системы являются минимизация расхода кокса, обеспечение требуемой производительности печи, выплавка кондиционного чугуна, температура жидких продуктов плавки в соответствии с требованиями последующего сталеплавления передела. При этом должны быть выполнены соответствующие ограничения технологии доменной плавки, обеспечивающие минимальную вероятность попадания технологического состояния печи в так называемые «критические» области (критические, аварийные режимы работы).

Выполнена адаптация разработанной интеллектуальной системы к технологическим условиям работы ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Обоснован выбор базовых режимов работы печи и опытных периодов для апробации системы. Рассчитаны значения критериев оценки процессов плавки и определены оптимальные диапазоны изменения. Выполнена диагностика хода печи в исследуемых периодах

ее работы и разработаны рекомендации по управлению процессом плавки.

Выводы

Опыт использования зарубежных экспертных систем свидетельствует о неудовлетворительной их адаптации к условиям металлургических предприятий Украины. Основываясь на предложенной в Институте черной металлургии НАН Украины идеологии, разработана интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой. Представлена функционально-алгоритмическая структура интеллектуальной системы и особенности взаимодействия ее подсистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Информационные системы в металлургии* / Спирин Н.А., Ипатов Ю.В., Лобанов В.И. и др. — Екатеринбург: Уральский государственный технический университет, 2001. — 617 с.
2. *Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки* / Спирин Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю. и др. — Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ, 2011. — 462 с.
3. *Доменное производство «Криворожстали»*. Монография под ред. чл.-корр. НАНУ В.И. Большакова / Большаков В.И., Бородулин А.В., Гладков Н.А. и др. — ИЧМ НАНУ, «Криворожсталь». Днепропетровск, Кривой Рог, 2004. — 378 с.
4. *Berkson J. Application of the logistic function to bio-assay* // *Journal of the American Statistical Association*. — Vol.39. — No. 227.
5. *Тогобицкая Д.Н.* Система анализа и выбора рациональных режимов работы металлургических агрегатов на ЭВМ // *Черная металлургия. Наука — технология — производство*. — М.: Металлургия, 1989. — С.384-390.

Поступила в редакцию 26.10.2016

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З УПРАВЛІННЯ ДОМЕННОЮ
ПЛАВКОЮ**

*Муравйова І.Г., Тогобицька Д.Н., Семенов Ю.С.,
Шумельчик Є.І., Бількова А.І., Білошанка О.А.*

Представлені функціональні та алгоритмічні особливості розробленої в Інституті чорної металургії інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень з управління доменної плавкою. Ідеологія побудови інтелектуальної системи заснована на діагностиці та прийнятті рішень з управління процесом плавки на основі розрахунку комплексних критеріїв оцінки процесів, що відрізняє її від відомих модельних систем. У комплексних критеріях об'єднані технологічні параметри і вихідні дані систем автоматизованого контролю процесів. Запропоновано і реалізовано в системі два методичних підходи до створення комплексних показників, на основі яких розроблені критерії оцінки: теплового стану доменної плавки, газодинамічного режиму, форми і положення пластичної зони, ефективності осьової коксової віддушини, впливу розплавів на футерівку металоприймача та інтегральний показник доменної шихти. Показано, що основними структурними комплексами системи є: контроль-вимірвальний (база даних); база знань; розрахунковий; модельний; діагностичний, формування рекомендацій з управління доменною плавкою. Виконано адаптацію розробленої інтелектуальної системи до технологічних умов роботи ДП №9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Обґрунтовано вибір базових режимів роботи печі і випробувальних періодів для апробації системи. Розраховані значення критеріїв оцінки процесів плавки і визначені оптимальні діапазони їх зміни. Виконана діагностика ходу печі в досліджуваних періодах її роботи і розроблені рекомендації з управління процесом плавки.

Ключові слова: доменна плавка, критерії оцінки процесів, функціонально-алгоритмічна структура інтелектуальної системи.

**INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM
MANAGEMENT OF BLAST FURNACE SMELTING**

*Murav'eva I.G., Togobitskaya D.N., Semenov Iu.S.,
Shumelchik E.I., Bel'kova A.I., Beloshapka E.A.*

Annotation. In this paper are presented functional and algorithmic features of the intellectual system, which were developed in Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute for supporting in making decision on the management of blast furnace smelting. The ideology of building an intelligent system is based on the diagnostics and decision-making on the management of the melting process on the basis of the calculation of complex criteria for evaluating processes, which distinguishes it from known models systems. In complex criteria are combined technological parameters and output data of automated process control systems. In the system are proposed and implemented two methodological approaches for creation complex indicators, on the basis of which were developed evaluation criteria for: thermal state of blast furnace smelting, gas dynamic regime, shape and location of the plastic zone, efficiency of the axial coke vent, effects of melts on the lining of a metal receptacle and integral index of blast furnace charge. It is shown that the main structural complexes of the system are: control-measuring (database); knowledge base; Calculated; Model; Diagnostic and complex of recommendations formation for the management of blast-furnace smelting. Adaptation of the developed intellectual system was carried out in the technological conditions of the work of blast furnace No. 9 PJSC «ArcelorMittal Kryviy Rih». Also is justified the choice of the basic operating modes of the furnace and the experimental periods for approbation of the system. The values of the evaluation criteria for smelting processes were calculated and the optimum ranges of variation were determined. The diagnoses of furnace stroke were made in the periods of its operation and were developed recommendations for controlling the smelting process.

Keywords: blast-furnace smelting, the criteria for assessing processes, functional and algorithmic structure of intelligent system.

УДК 624.953.014.2.004.15

*Насонова С.С., Куприна Л.А., Науменко Т.С.***ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗЕРВУАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ****ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр**

В работе рассматриваются вопросы вероятностного моделирования показателей надежности стальных резервуаров для хранения нефтепродуктов. В качестве методологической основы такого моделирования принята известная в теории надежности сложных систем гипотеза «слабейшего звена». Нефтяной резервуар рассматривается как сложная система, состоящая из 4-х последовательно соединенных (в смысле надежности) подсистем: днища, кровли, цилиндрической стенки и узла сопряжения стенки с днищем. Сварные соединения принимаются равнопрочными основному металлу резервуара. Считается, что резервуар выполняет свойственные ему функции по приему, хранению и сливу нефтепродуктов в нормальных режимах работы в соответствии с действующими нормативными документами и с проектным уровнем залива, а ухудшение технического состояния резервуара в период эксплуатации происходит постепенно и обуславливается физическим износом его металлоконструкций. Форс-мажорные ситуации типа катастроф, грубых ошибок проектирования, изготовления и монтажа и т.д. не рассматриваются. Предложены новые модели комплексной оценки технического состояния нефтяных резервуаров, которые могут использоваться для управления надежностью данных сооружений, как на стадии их проектирования, так и в процессе эксплуатации. Параметры этих моделей могут легко корректироваться по результатам натурных обследований резервуаров в период эксплуатации, что повышает точность прогноза в каждом отдельном случае.

Ключевые слова: нефтяные резервуары, надежность, техническое состояние, математическое моделирование, гипотеза «слабейшего звена».

Стальные вертикальные цилиндрические резервуары для долгосрочного хранения нефтепродуктов (РВС), составляющие значительную часть резервуарного парка Украины, в настоящее время находятся в условиях активного физического износа. В связи с этим, в последние годы в значительной мере повысился фактический риск их отказов и, тем самым, возросла роль фактора своевременного и эффективного восстановления работоспособности в процессе эксплуатации. Все это требует уточнения действующих нормативных документов по эксплуатации указанных объектов в части сроков ревизий технического состояния, что связано, прежде всего, с адекватным математическим описанием показателей их надежности и с разработкой новых моделей и методов управления надежностью в условиях физического износа. Соответствующие вопросы тем более актуальны приме-

нительно к объектам, относящимся к сооружениям высокой степени ответственности, для которых обеспечение надежности имеет решающее значение [1].

Постановка проблемы

С точки зрения надежности большинство строительных конструкций можно рассматривать после декомпозиции как систему с последовательным соединением элементов. Для нормального функционирования такой системы все ее элементы должны быть работоспособными. Отказ же хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы. Под отказом понимается переход объекта из работоспособного состояния в неработоспособное состояние. В разнообразных прикладных задачах, связанных с моделированием надежности строительных конструкций возникает проблема формирования некоторого оператора S , связывающего показатели

надежности конструкции с вероятностными характеристиками ее конструктивных элементов. В случае независимости отказов элементов (т.е. отсутствия причинно-следственных связей между отказами) эта проблема легко решается на основе известного правила умножения вероятностей. Если же отказы отдельных элементов рассматриваемой системы статистически зависимы, то построить оператор S , адекватно отображающий зависимость показателей надежности конструкции от вероятностных характеристик ее конструктивных элементов, значительно сложнее, а связанные с этим вопросы требуют дальнейших исследований.

Анализ последних исследований и публикаций

Известный в теории вероятностей подход к построению оператора S в случае зависимых отказов основан на синтезе функций (интегральной или плотности) совместного распределения вероятностей наработок до отказа отдельных конструктивных элементов [2]. Однако для решения практических задач оценки надежности строительных конструкций такой подход крайне неудобен и фактически не используется [1, 3–5]. В данной статье применительно к моделированию надежности стальных резервуаров для нефтепродуктов обсуждаются вопросы формирования оператора S на основе модели «слабейшего звена» [2].

Формулирование цели исследования

Цель статьи – предложить новые, основанные на гипотезе «слабейшего звена», вероятностные модели оценки технического состояния нефтяных резервуаров, находящихся в эксплуатации.

Изложение основного материала исследования

Нефтяной резервуар рассматривается как сложная система, состоящая из 4-х подсистем (основных конструктивных элементов): днища и кровли, цилиндрической стенки (нижние и верхние пояса безмоментной области корпуса резервуара) и узла сопряжения стенки с днищем. Схема декомпозиции резервуара принимается в виде, показанном на рисунке.

Сварные соединения принимаются равнопрочными основному металлу резервуара. Считается, что резервуар выполняет свойственные ему функции по приему, хранению и отпуску нефтепродуктов в нормальных режимах работы в соответствии с действующими нормативными документами и с проектным уровнем залива, а ухудшение технического состояния резервуара в период эксплуатации происходит постепенно

и обуславливается физическим износом его металлоконструкций. Форс-мажорные ситуации типа катастроф, грубых ошибок проектирования, изготовления и монтажа и т.д. не рассматриваются.



Схема декомпозиции резервуара

РВС проектируются с определенным запасом толщины конструктивных элементов, что обуславливает соответствующие начальные запасы прочности, устойчивости и герметичности. В период эксплуатации техническое состояние резервуарных конструкций объективно ухудшается. Вследствие коррозионного износа толщина конструктивных элементов РВС уменьшаются, накапливаются и развиваются другие повреждения, что неминуемо приводит к повышению риска отказов этих сооружений.

Согласно действующим нормативным документам РВС на протяжении всего срока службы должны отвечать следующим нормативным требованиям прочности, устойчивости и герметичности:

– условию прочности цилиндрической стенки

$$\gamma_c R_y \delta_i(t) \geq p_i r, i = \overline{1, n}; \quad (1)$$

– условию устойчивости цилиндрической стенки

$$\frac{\sigma_1(t)}{\sigma_{cr1}(t)} + \frac{\sigma_2(t)}{\sigma_{cr2}(t)} \leq 1; \quad (2)$$

– условию прочности узла сопряжения цилиндрической стенки с днищем

$$R_y \gamma_c \delta_1^2(t) \geq 6M_0; \quad (3)$$

– условию герметичности днища

$$\delta_{дн}(t) \geq \frac{\delta_{дн0}}{2}; \quad (4)$$

– условию герметичности кровли

$$\delta_{kp}(t) \geq \frac{\delta_{kp0}}{2}. \quad (5)$$

В приведенных формулах обозначено:

n – число поясов цилиндрической стенки;
 $\delta_i(t)$ ($i = \overline{1, n}$) – текущая толщина i -го пояса;
 $\delta_{\partial n}(t), \delta_{kp}(t)$ – текущая толщина, соответственно, днища и кровли;

r – радиус срединной поверхности резервуара;

R_y – расчетное сопротивление стали;

γ_c – коэффициент условий работы (для нижнего пояса $\gamma_c = 0,6$; для остальных поясов цилиндрической стенки $\gamma_c = 0,9$; для уторного узла $\gamma_c = 1,2$);

p_i – гидростатическое давление на i -й пояс;

$\sigma_1(t), \sigma_2(t)$ – текущие значения меридиональных и кольцевых напряжений, возникающих в стенке от, соответственно, продольных и радиальных внешних нагрузок;

$\sigma_{cr1}(t), \sigma_{cr2}(t)$ – критические значения напряжений при сжатии, соответственно, в осевом и радиальном направлении;

M_0 – изгибающий момент в зоне сопряжения стенки и днища.

Заметим, что текущая толщина любого конструктивного элемента резервуара $\delta(t)$ описывается соотношением:

$$\delta(t) = \delta_0 - \Delta(t), \quad (6)$$

где δ_0 и $\Delta(t)$ – соответственно, проектное значение толщины и текущая величина необратимого коррозионного износа конструктивного элемента.

Введем следующие обозначения:

$Z_i(t) = \gamma_c R_y \delta_i(t) - p_i r$ – текущий запас прочности i -го пояса цилиндрической стенки;

$$Z_c(t) = 1 - \left(\frac{\sigma_1(t)}{\sigma_{cr1}(t)} + \frac{\sigma_2(t)}{\sigma_{cr2}(t)} \right) - \text{текущий за-}$$

пас устойчивости цилиндрической стенки;

$Z_{yc}(t) = R_y \gamma_c \delta_1^2(t) - 6M_0$ – текущий запас прочности узла сопряжения стенки с днищем;

$$Z_{kp}(t) = \delta_{kp}(t) - \frac{\delta_{kp0}}{2} - \text{текущий запас гер-}$$

метичности кровли;

$$Z_{\partial n}(t) = \delta_{\partial n}(t) - \frac{\delta_{\partial n0}}{2} - \text{текущий запас гер-}$$

метичности днища.

В процессе эксплуатации резервуара под влиянием коррозионного износа толщина его конструктивных элементов уменьшается. Соответственно, ухудшается техническое состояние резервуара (уменьшаются запасы прочности, устойчивости и герметичности), что может привести к наступлению нормативного отказа (нарушению хотя бы одного из неравенств (1)–(5)). Если своевременно не устранить такой отказ (выполнить ремонт), то наступает отказ физический, который сопряжен с огромными экономическими, экологическими и другими потерями. Поэтому прогнозирование наступления нормативных отказов резервуаров вследствие деградации их конструктивных элементов, обнаружение и устранение эксплуатационных повреждений резервуарных конструкций – это важнейшие задачи технического обслуживания нефтяных резервуаров, находящихся в эксплуатации.

Имеющиеся данные многочисленных натурных обследований [3] показывают, что коррозионный износ конструктивных элементов РВС имеет нормальный закон распределения вероятностей. Поэтому все указанные запасы далее рассматриваются как случайные функции коррозионного износа, зависящие от времени как от параметра, а в каждый фиксированный момент времени их значения считаются распределенными по нормальному закону.

Введем в рассмотрение понятия индексов обеспеченности прочности, устойчивости и герметичности резервуарных конструкций. Индексом обеспеченности прочности i -го пояса цилиндрической стенки в текущий момент времени t будем называть функцию следующего вида:

$$w_i(t) = \frac{\gamma_c R_y \overline{h_i}(t) - p_i r}{\gamma_c R_y \widetilde{h_i}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (7)$$

где надстрочная черта и волнистая линия обозначают, соответственно, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение толщины пояса.

Аналогично определяются: индекс обеспеченности прочности уторного узла в текущий момент времени t :

$$w_{yc}(t) = \frac{\gamma_c R_y \overline{h_1^2}(t) - 6M_0}{\gamma_c R_y \widetilde{h_1^2}}. \quad (8)$$

Индекс обеспеченности устойчивости цилиндрической стенки в текущий момент времени t :

$$w_c(t) = \frac{\bar{Z}_c(t)}{\tilde{Z}_c(t)}. \quad (9)$$

Индексы обеспеченности герметичности днища и кровли в текущий момент времени t :

$$w_{\partial n}(t) = \frac{\bar{\delta}_{\partial n}(t) - \delta_{\partial n 0} / 2}{\tilde{\delta}_{\partial n}(t)}; \quad (10)$$

$$w_{kp}(t) = \frac{\bar{\delta}_{kp}(t) - \delta_{kp 0} / 2}{\tilde{\delta}_{kp}(t)}. \quad (11)$$

Заметим, что все приведенные выше индексы являются детерминированными функциями времени эксплуатации резервуара и выражаются через математические ожидания и среднеквадратические отклонения толщины основных конструктивных элементов резервуара. Их значения могут прогнозироваться во времени и корректироваться по фактическим замерам толщины конструктивных элементов при технических обследованиях резервуара.

Учитывая то, что критерием нормативного отказа резервуара является исчерпание хотя бы одного из указанных выше запасов прочности, устойчивости или герметичности, вероятности сохранения эксплуатационных качеств резервуарных конструкций в процессе эксплуатации можно выразить через соответствующие индексы обеспеченности следующим образом.

Вероятность сохранения прочности i -го пояса на протяжении времени t :

$$P_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{w_i} \exp\left(-\frac{u}{2}\right)^2 du = \Phi(w_i), \quad (12)$$

$\overline{i = 1, n.}$

Вероятность сохранения устойчивости цилиндрической стенки на протяжении времени t :

$$P_{cm}^y(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{w_c} \exp\left(-\frac{u}{2}\right)^2 du = \Phi(w_c). \quad (13)$$

Вероятность сохранения прочности узла

сопряжения стенки с днищем на протяжении времени t :

$$P_{yc}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{w_{yc}} \exp\left(-\frac{z}{2}\right)^2 dz = \Phi(w_{yc}). \quad (14)$$

Вероятности сохранения герметичности днища и кровли:

$$P_{\partial n}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{w_{\partial n}} \exp\left(-\frac{z}{2}\right)^2 dz = \Phi(w_{\partial n}); \quad (15)$$

$$P_{kp}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-w_{kp}} \exp\left(-\frac{z}{2}\right)^2 dz = \Phi(w_{kp}). \quad (16)$$

Здесь $\Phi(\cdot)$ - функция нормированного нормального распределения (функция Лапласа).

Заметим, что для того, чтобы по заданному значению индекса обеспеченности w найти соответствующую ему вероятность P (или наоборот) можно воспользоваться, например, известной в теории вероятностей табуляционной таблицей функции нормированного нормального распределения вероятностей. Фрагмент этой таблицы приведен ниже (см. табл.).

При определении вероятности безотказной работы всего резервуара будем исходить из следующих положений:

1. Отказ резервуара наступает при переходе в неработоспособное состояние хотя бы одного из его основных конструктивных элементов.

2. Отказ конструктивных элементов резервуара обуславливается их физическим износом, а первым в процессе эксплуатации отказывает наиболее поврежденный элемент.

3. Поскольку общим механизмом физического износа стального резервуара является коррозия, то отказы его металлоконструкций являются событиями статистически зависимыми.

Учитывая данные положения (их справедливость достаточно очевидна) и принимая в качестве меры поврежденности металлоконструкций резервуара на том или ином этапе эксплуатации индексы обеспеченности прочности, устойчивости и герметичности, можно считать, что первым в процессе эксплуатации отказывает тот

Значения параметра w в зависимости от величины P

P	0,5000	0,8413	0,9332	0,9773	0,9934	0,9987	0,9997	0,9999
w	0	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4

конструктивный элемент, который соответствует наименьшему из указанных индексов.

Однако чем меньше индекс, тем больше вероятность отказа соответствующего конструктивного элемента. Поэтому вероятность безотказной работы резервуара (как системы последовательно соединенных днища, узла сопряжения стенки с днищем, цилиндрической стенки и кровли) на протяжении времени t с начала эксплуатации может быть найдена на основе гипотезы «слабейшего звена» [2]. Эта вероятность определяется следующим образом:

$$P_p(t) = \min \{ P_{cm}(t), P_{yc}(t), P_{дн}(t), P_{кр}(t) \}, \quad (17)$$

где вероятность безотказной работы цилиндрической стенки $P_{cm}(t)$ определяются по формуле:

$$P_{cm}(t) = \min \{ P_i(t) (i = \overline{1, n}), P_{cm}^y(t) \} = \min \{ \Phi(w_1), \Phi(w_2), \dots, \Phi(w_n), \Phi(w_c) \}, \quad (18)$$

а вероятности безотказной работы узла сопряжения, днища и кровли – по формулам (14)–(16).

С учетом моделей (7)–(18) несложно найти и среднее время наработки до нормативного отказа резервуара:

$$\tau_p = \min \{ \tau_{cm}, \tau_{yc}, \tau_{дн}, \tau_{кр} \}, \quad (19)$$

где средние наработки до отказа узла сопряжения, днища и кровли (соответственно $\tau_{дн}$, τ_{yc} , $\tau_{кр}$) вычисляются путем приравнивания нулю соответствующего индекса обеспеченности и решения полученного уравнения относительно t , а средняя наработка до отказа цилиндрической стенки находится как минимальное время среди наработок до отказа ее поясов.

Выводы

Предложенные модели (7)–(19) позволяют получить комплексную вероятностную оценку технического состояния нефтяных резервуаров. Параметры этих моделей могут корректироваться по данным натурных обследований, что повышает точность прогноза в каждом отдельном случае. Кроме того, данные модели могут использоваться как прогнозные модели на стадии проектирования резервуаров и как модели управления надежностью в процессе эксплуатации этих сооружений. В итоге рассмотренные модели могут служить методологической основой при исследовании проблем надежности и долговечности резервуаров, находящихся в эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Насонова С.С., Семенец С.Н. Оценка фактора восстановления нефтяных резервуаров в процессе эксплуатации // Інформаційні технології в освіті, науці та управлінні. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 2015. – № 3. – С.72-77.
2. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. – М.: Мир, 1980. – 605 с.
3. Егоров Е.А. Исследование и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации // Сб. научных трудов ПГАСА. – Днепропетровск: ПГАСА, 1996. – С.99.
4. Насонова С.С., Семенец С.Н. Моделирование критериев оценки эксплуатационного состояния нефтяных резервуаров // Сб. научных трудов НГУ. – Днепропетровск: НГУ, 2013. – № 1. – С.87-89.
5. Семенец С.Н., Насонова С.С. Управление эксплуатационным состоянием нефтяных резервуаров по экономическим критериям // Інформаційні технології в освіті, науці та управлінні. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 2012. – № 1. – С.184-187.

Поступила в редакцию 05.10.2016

Рецензент: д.т.н. Олевский В.И.

ІМОВІРНІСНІ МОДЕЛІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СТАНУ РЕЗЕРВУАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ*Насонова С.С., Купріна Л.О., Науменко Т.С.*

У роботі розглядаються питання імовірнісного моделювання показників надійності сталевих резервуарів для зберігання нафтопродуктів. Як методологічна основа такого моделювання прийнята відома в теорії надійності складних систем гіпотеза «слабкої ланки». Нафтовий резервуар розглядається як складна система, що складається з 4-х послідовно сполучених (у сенсі надійності) підсистем: днища, покрівлі, циліндричної стінки і вузла сполучення стінки з днищем. Зварні з'єднання приймаються рівними за міцністю основному металу резервуару. Вважається, що резервуар виконує властиві йому функції по прийому, зберіганню і зливу нафтопродуктів в нормальних режимах роботи відповідно до чинних нормативних документів і з проектним рівнем заливки, а погіршення технічного стану резервуару в період експлуатації відбувається поступово і обумовлюється фізичним зносом його металоконструкцій. Ситуації типу катастроф, грубих помилок проектування, виготовлення і монтажу і т.п. не розглядаються. Запропоновані нові моделі комплексної оцінки технічного стану нафтових резервуарів, які можуть використовуватися для управління надійністю цих споруд, як на стадії їх проектування, так і в процесі експлуатації. Параметри цих моделей можуть коригуватися за результатами натурних обстежень резервуарів в період експлуатації, що підвищує точність прогнозу у кожному окремому випадку.

Ключові слова: нафтові резервуари, надійність, технічний стан, математичне моделювання, гіпотеза «слабкої ланки».

PROBABILISTIC MODELS OF THE OPERATING STATE OF RESERVOIR CONSTRUCTIONS*Nasonova S.S., Kuprina L.A., Naumenko T.S.*

The questions of probabilistic design of reliability of steel reservoirs indexes are in-process examined for storage of oil products. As methodological basis of such design the known is accepted in the theory of reliability of the difficult systems hypothesis of the «weakest link». A petroleum reservoir is examined as a difficult system consisting of 4 the consistently united (in sense of reliability) subsystems: bottom, roof, cylindrical wall and knot of interface of wall with a bottom. The weld fabricated connections are accepted by equal on durability to the parent metal of reservoir. It is considered that a reservoir executes peculiar to it functions on a reception, storage and weathering of oil products in normal office hours in accordance with operating normative documents and with the project level of bay, and worsening of the technical state of reservoir in the period of exploitation takes place gradually and stipulated by the physical wear of its metallic constructions. Situations of type of catastrophes, flagrant errors of planning, making and editing not examined. The new models of complex estimation of the technical state of petroleum reservoirs are offered that can be used for a management by reliability of these building both on the stage of their planning and in the process of exploitation. The parameters of these models can easily be corrected on results the model inspections of reservoirs in the period of exploitation that promotes exactness of prognosis in every special case.

Keywords: petroleum reservoirs, reliability, technical state, mathematical design, hypothesis of the «weakest link».

*Немчинов С.І.***СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТРАВЕРСИ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРЕСА****ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро**

В даній роботі досліджено напружено-деформований стан траверси центрального виштовхувача гідравлічного пресу за допомогою скінченно-елементного моделювання. Встановлено, що в траверсі при зусиллі виштовхування 1,52 МН найбільші еквівалентні напруження, які обчислювалися за формулою Мізеса, спостерігаються в місцях прикладення навантажень, опорних поверхонь, різкої зміни геометрії. Показано, що еквівалентні напруження збільшуються по висоті на внутрішній поверхні центрального циліндра і зменшуються – на внутрішніх поверхнях бічних циліндрів. Виявлено, що максимальні переміщення та деформації спостерігаються у верхній частині траверси, а мінімальні – у нижній. Аналіз епюр напружень і деформацій показав, що існуюча геометрія траверси не є оптимальною – напруження та деформації в її різних частинах суттєво відрізняються. На підставі аналізу напружено-деформованого стану було запропоновано варіант зміни геометрії деяких частин траверси, який дозволив при незначному збільшенні напружень зменшити її вагу. Отримані результати можуть бути застосовані при проектуванні нових та удосконаленні існуючих гідравлічних пресів.

Ключові слова: гідравлічний прес, траверса, епюра, напруження, деформація, переміщення.

Вступ

Одними з основних елементів гідравлічних пресів є траверси, які при великих габаритах і масі зазнають значних питомих навантажень. В роботі [1] надано аналіз руйнації базових деталей пресів. Тому для забезпечення надійної й тривалої експлуатації гідравлічних пресів необхідно забезпечити їх міцність та жорсткість.

Отже проблема вибору раціональної форми траверси на етапі проектування є дуже важливою і має не тільки технічні, але й економічні аспекти.

Аналіз досліджень і публікацій

На сьогодні накопичено певний досвід проектування траверс гідравлічних пресів, але їх розрахунок у більшості випадків виконується наближено, що пояснюється складністю опису напружено-деформованого стану і обумовлено конструктивними особливостями.

Аналіз літературних даних показує, що для визначення напружено-деформованого стану (НДС) базових елементів пресів застосовують або методи опору матеріалів [2–3], або метод скінченних елементів (МСЕ) тільки для напру-

женого стану [4]. Наприклад, за існуючими методиками розрахунку на міцність просторова конструкція траверси замінюється двома балками з широкої та вузької сторін, а зусилля циліндра прикладається в центрах тяжіння опорних півкілець. Така методика не відповідає потребам сучасного машинобудування, оскільки не враховує особливості геометрії конструкції траверси, яка є досить складною, і не дає достатньо повного уявлення про напружено-деформований стан і, як наслідок, не дозволяє зробити висновки з раціонального проектування.

Зовсім відсутні роботи з системного дослідження деформованого стану траверс.

Мета роботи

Мета роботи – скінченно-елементне моделювання напружено-деформованого стану та обґрунтування вибору можливої геометрії нижньої траверси гідравлічного преса зусиллям 20-МН.

Виклад основного матеріалу дослідження

Оскільки траверса являє собою тіло складної геометрії, то аналітичні методи розрахунку практично неможливі. Лише при застосуванні

чисельних методів, які реалізуються на ЕОМ, можна отримати надійні результати. Для розв'язування задачі застосовувався варіаційний принцип мінімуму потенціальної енергії, який дозволяє сформулювати задачу про напружено-деформований стан пружного тіла як задачу мінімізації квадратичного функціоналу [5]. Розв'язування задачі мінімізації відбувалося на скінченномірному просторі шляхом переходу від континуального середовища до дискретного. При побудові дискретної моделі застосовувалась лінійна апроксимація переміщень на трикутниках.

В якості інструменту чисельних досліджень використовували базову конфігурацію SolidWorks Premium, яка дозволила виконати детальний аналіз НДС траверси з урахуванням особливостей і режимів експлуатації. На підставі робочих креслень для розрахунку була створена геометрична модель, задавалися фізико-механічні властивості матеріалу, граничні умови. Оскільки траверса та прикладене навантаження симетричні, то дослідження проводилося для половини деталі. Величини навантажень визначалися відповідно до умов роботи траверси. Габаритні розміри траверси склали 1440×800×650 мм. В якості матеріалу була вибрана сталь 35Л з модулем пружності $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,32$, межею текучості $\sigma_m = 248 \text{ МПа}$, межею міцності $\sigma_{мц} = 482,5 \text{ МПа}$. Граничні умови задавали таким чином, щоб виключити переміщення траверси як абсолютно жорсткого тіла. В результаті дискретизації отримали 9869 елементів та 16736 вузлів.

У результаті статичного розрахунку траверси отримані такі параметри напружено-деформованого стану:

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальні напруження в напрямках відповідних осей;

$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – дотичні напруження у відповідних координатних площинах;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження;

$\sigma_{екв}$ – еквівалентні напруження, які обчислені за формулою Мізеса;

U_x, U_y, U_z – переміщення в напрямках відповідних осей;

n – коефіцієнт запасу міцності.

Отримані в результаті розрахунку поля напружень, переміщень і деформацій існуючої траверси показали, що значення досліджених характеристик в різних частинах траверси суттєво відрізняються. При цьому максимальні напруження, які обчислені за формулою Мізеса, спостерігаються в місцях прикладення навантажень

й опорних поверхонь та місцях різкої зміни геометрії.

Аналіз полів деформацій і переміщень існуючої траверси показав, що максимальні деформації і переміщення спостерігаються в верхній частині траверси (в кільцевій частині центрального циліндра), а мінімальні – в двох циліндричних частинах траверси та її нижній частині (в основі траверси). Так деформація у верхній частині центрального циліндра складала приблизно 0,7–0,9 мм, то у нижній частині того самого циліндра – на порядок менше. Це свідчить про те, що конструкція траверси не є оптимальною.

В роботі пропонується нова, більш раціональна, геометрія траверси.

Аналіз епюр напружень рекомендованої траверси показав, що максимальні напруження спостерігаються в місцях з'єднання великого та малих циліндрів і не перевищують 130 МПа. В зоні контакту напруження не перевищують 90–100 МПа. Решта напружень значно нижче. При цьому максимальні переміщення суттєво не змінюються.

За результатами дослідження (рис. 1) встановлено:

– нормальні та дотичні напруження суттєво змінюються по висоті траверси (наприклад, при $z = 100 \text{ мм}$ напруження $\sigma_x = -21 \text{ МПа}$, а при $z = 400 \text{ мм}$ $\sigma_x = -40 \text{ МПа}$);

– величини напружень σ_x, σ_z значно більші величин напружень σ_y , а величини τ_{xy} значно більші величин напружень τ_{xz}, τ_{yz} .

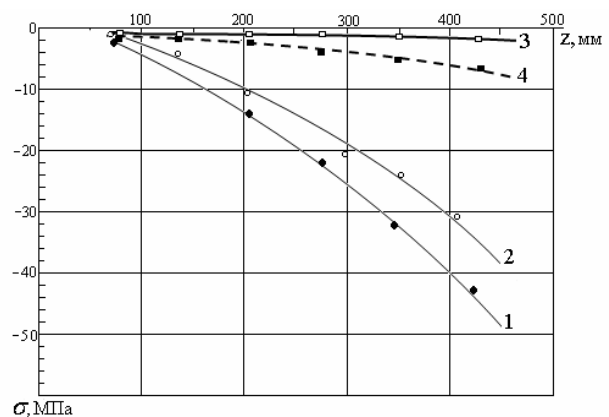


Рис. 1. Графік залежності нормальних і дотичних напружень від координати z : 1 – нормальне напруження σ_x ; 2 – нормальне напруження σ_z ; 3 – нормальне напруження σ_y ; 4 – дотичне напруження τ_{xy}

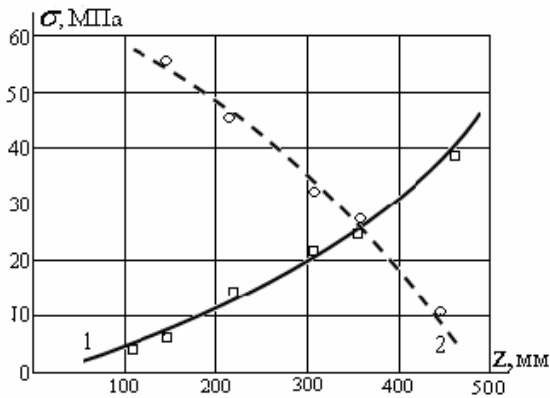
Слід зауважити, що еквівалентні напружен-

ня $\sigma_{екв}$ на внутрішніх поверхнях центрального та бічних циліндрів також суттєво змінюються по висоті, але характери зміни напружень різні. На внутрішній поверхні центрального циліндра еквівалентні напруження збільшуються по висоті, а на внутрішній поверхні бічного циліндра – зменшуються (рис. 2,а).

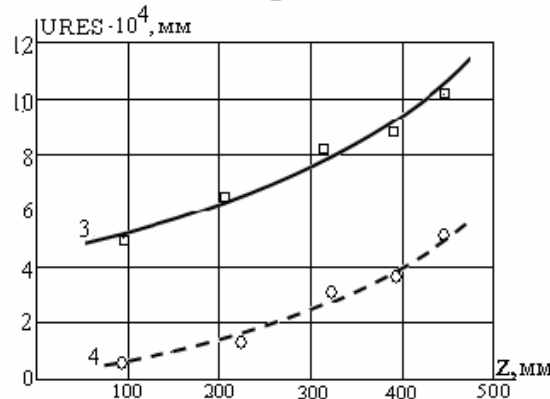
Слід звернути увагу на те, що еквівалентні напруження у верхній частині траверси (на верхньому поясі) зменшуються, а на нижній частині (у нижньому поясі) збільшуються, а при $z > 40\text{ мм}$ спостерігається тенденція зростання еквівалентних напружень.

Значення обчислених головних напружень $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ не перевищують значення границі текучості σ_m .

Сумарні переміщення $URES$ збільшують-



а



б

Рис. 2. Графіки залежності еквівалентних напружень та переміщень від координати z для внутрішніх циліндричних частин траверси: а – залежність еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ від координати z : 1 – внутрішня поверхня центрального циліндра, 2 – внутрішня поверхня бічного циліндра; б – залежність переміщень $URES$ від координати z : 3 – поверхня центрального циліндра, 4 – поверхня бічного циліндра

ся в обох випадках. При цьому максимальні переміщення спостерігаються у верхньому поясі траверси (у місці прикладення навантаження), а найнижчі переміщення – у нижньому поясі (рис. 2,б).

Характер розподілу коефіцієнтів запасу міцності (рис. 3) показав, що мінімальні коефіцієнти запасу міцності в модернізованій траверсі спостерігаються в нижніх частинах малих циліндрів (1,7–5,21). Взагалі у верхній частині траверси коефіцієнти запасу міцності значно більші, ніж у нижній частині. «Нелогічно» високі коефіцієнти запасу міцності спостерігаються у невеличкій області центрального циліндра (при $z \approx 40\text{ мм}$).

Отримані результати дослідження показали, що міцність і жорсткість нової траверси забезпечені.

Зміна геометрії дозволила зменшити масу траверси майже на 14 %.

Висновки

Напружено-деформований стан траверси гідравлічного преса, який отримано за допомогою кінцево-елементного моделювання, характеризується загальною і місцевою нерівномірністю напружень і деформацій. Загальна нерівномірність напруженого стану в основному визначається нерівномірним розподілом наван-

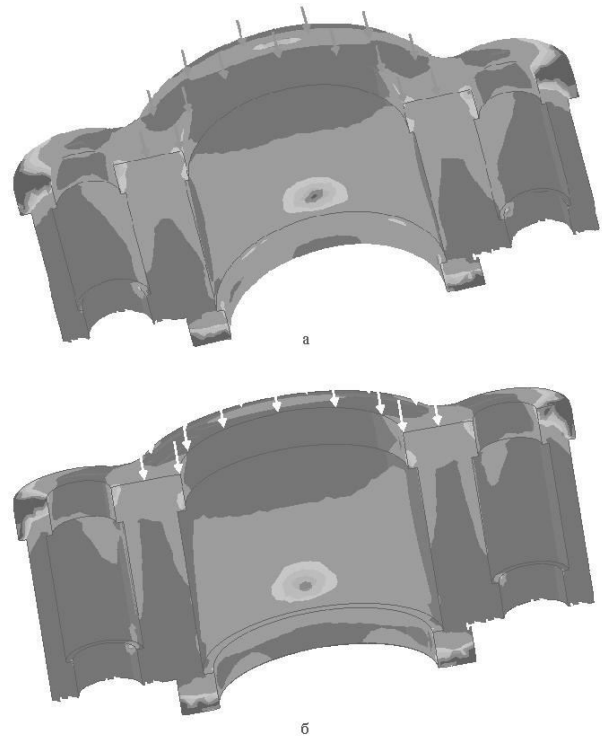


Рис. 3. Просторові епюри коефіцієнтів запасу міцності траверси: а – існуюча траверса; б – модернізована траверса

тажень. Найбільші напруження спостерігаються в місцях прикладення навантаження та опор. Місцева нерівномірність напруженого стану визначається концентрацією напружень, яка обумовлена геометричними та силовими факторами.

За результатами досліджень напружено-деформованого стану траверси встановлено зони, в яких спостерігаються максимальні нормальні й дотичні напруження та деформації. Аналіз полів напружень і деформацій показав, що існуюча геометрія траверси не є оптимальною — напруження і деформації в її різних частинах суттєво відрізняються.

Встановлено, що величини напружень σ_x , σ_z значно більші напружень σ_y , а τ_{xy} значно більші напружень τ_{xz} , τ_{yz} . Запропоновано підхід, за яким можна змінити геометрію траверси при незначній зміні напружень і деформацій і, як наслідок, зменшити вагу станини. Отримані результати мають практичне застосування при проектуванні нових, удосконаленні існуючих гідравлічних пресів і є основою для подальших досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пылайкин П.А. Анализ разрушений базовых деталей мощных гидравлических прессов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. — 1966. — № 3. — С.21-27.
2. Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебн. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 560 с.
3. Коркин Н.П., Сурков И.А., Тимохин И.В. Влияние эксцентриситета нагружения гидравлического пресса на напряженное состояние подвижной поперечины // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. — 2008. — № 4. — С.28-32.
4. Дащенко О.Ф., Лимаренко О.М. Напряжено-деформованный стан базовых деталей гідравлічних пресів // Машинознавство. — 2013. — № 1-2. — С.33-38.
5. Тимошенко С.П., Гудбер Дж. Теория упругости. — М.: Наука, 1975. — 576 с.

Надійшла до редакції 20.10.2016

Рецензент: д.т.н., проф. Виноградов Б.В.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРАВЕРСЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕССА

Немчинов С.И.

В данной работе исследовано напряженно-деформированное состояние траверсы центрального выталкивателя гидравлического пресса методом конечно-элементного моделирования. Установлено, что в траверсе при усилении выталкивания 1,52 МН наибольшие эквивалентные напряжения, вычисленные по формуле Мизеса, наблюдаются в местах приложения нагрузок, опорных поверхностей, резкого изменения геометрии. Показано, что эквивалентные напряжения увеличиваются по высоте на внутренней поверхности центрального цилиндра и уменьшаются — на внутренних поверхностях боковых цилиндров. Выявлено, что максимальные перемещения и деформации наблюдаются в верхней части траверсы, а минимальные — в нижней. Анализ эпюр напряжений и деформаций траверсы показал, что существующая геометрия траверсы не является оптимальной — напряжения и деформации в ее разных частях существенно отличаются. На основании анализа напряженно-деформированного состояния предложен вариант изменения геометрии некоторых частей траверсы, который позволил при незначительном увеличении напряжений уменьшить ее вес. Полученные результаты могут использоваться при проектировании новых и усовершенствовании существующих гидравлических прессов.

Ключевые слова: гидравлический пресс, траверса, эпюра, напряжение, деформация, перемещение.

FINITE ELEMENT MODELLING OF STRESS-STRAIN STATE OF THE TRAVERSE OF THE HYDRAULIC PRESS

Nemchinov S.I.

In the present article the stress-strain state of the traverse of the central ejector of the hydraulic press has been investigated by using finite element modeling. It is established that in the traverse with the force of pushing out 1,52 MN, the largest equivalent stresses, calculated according to the Mises formula, are observed in the places of application of loads, bearing surfaces, sharp changes in geometry. It is shown that equivalent stresses increase in height on the inner surface of the central cylinder and decrease on the inner surfaces of the side cylinders. It is found that the maximum displacements and deformations are observed in the upper part of the traverse, and the minimum — in the lower part. The analysis of the diagrams of the investigated stresses and strains showed that the existent geometry of traverse is not optimal — the stresses and strains in its different parts differ significantly. Based on the analysis of the stress-strain state, a variant of changing the geometry of some parts of the traverse is proposed, which, with an insignificant increase in stress, reduced its weight. The obtained results can be used for improvement of existing and development of new hydraulic presses.

Keywords: hydraulic press, traverse, diagram, stress, strain, displacement.

УДК 519.6

*Олевский В.И.^а, Олевская Ю.Б.^б, Шапка И.В.^а***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СБОРКИ СОСТАВНОЙ ОБОЛОЧКИ**^а ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр^б ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепр

Сборка является заключительным этапом изготовления машин, аккумулирующим накопленные на предшествующих этапах несовершенства. Для составной оболочки многоступенчатых ракет контейнерного базирования существующий уровень отклонений отсеков часто приводит к выбраковке изделия из-за превышения габаритных размеров и предельных значений сборочных усилий. Совмещение конструкции по линейным базам на производстве отлажено, а по угловым вызывает затруднения и требует дополнительных затрат. Целью настоящего исследования является создание математической модели сборки составной оболочки, учитывающей начальные отклонения отсеков. Задачей исследования является разработка методики имитационного моделирования и идентификации параметров математической модели зависимости габаритных размеров и разворота изделия от параметров начального отклонения отсеков. На основе анализа конструкции методами аналитической геометрии и регрессионного анализа создана новая методика компьютерного моделирования составных оболочек с отклонениями. Для набора несовершенств, выявленного по результатам исследования реального технологического процесса, проведен имитационный эксперимент. Осуществлен розыгрыш случайной матрицы эксперимента при нормальном распределении параметров в реальных диапазонах их изменения. Результатом исследования является методика имитационного эксперимента, а также полученная на ее основе регрессионная модель сборки для 8 факторов. Модель хорошо согласуется с физическими представлениями о технологическом процессе и позволяет проводить оптимизацию технологического процесса. Она была использована в автоматизированной системе управления технологическим процессом сборки ракет контейнерного базирования.

Ключевые слова: многофакторная модель, многоступенчатая ракета, сборка, автоматизированная система управления.

Постановка проблемы

Сборочные операции являются заключительным этапом изготовления машин, где проявляются все накопленные технологические несовершенства [1]. Особый интерес представляет процесс сборки составных оболочек и втягивания их в контейнер (втягивание вала во втулку) под действием осевой движущей силы, соответствующий, например, горизонтальной сборке многоступенчатых твердотопливных ракет контейнерного базирования. Опыт сборки показывает, что совмещение по линейным базам (по длине) не вызывает затруднений, а совмещение по угловым базам (по углу разворота

вала относительно втулки) оказывается затруднительным и требует существенных дополнительных затрат. Решение проблемы возможно путем моделирования с учетом технологических отклонений на основе предложенного в [2] метода.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ последних работ, в которых приводятся рекомендации по выбору параметров сборки ракетных конструкций [1,3–4], показывает, что конструкторы видят проблему в точной стыковке отсеков. При этом погрешности формы отсеков, за исключением весовых деформаций, не учитываются [1]. Отсутствуют оценки точно-

сти сборки оболочек, что подтверждает необходимость настоящего исследования.

Формулирование цели исследования

Сборка ракеты включает монтажные работы в отсеках, ориентирование их между собой, стыковку, соединение всех функциональных цепей, монтаж изделия в контейнере. Для перемещения агрегатов используют тележки-подставки, систему рельсовых путей, подъемно-транспортные средства. Три степени свободы перемещения изделия на тележке используются при стыковке ступеней. Точная стыковка ступеней заключается в размещении их на тележках, стыковке поверхностей, установке технологических болтов и втягивании изделия в контейнер. Угол поворота изделия при втягивании в контейнер определяется приведенным эксцентриситетом осевой движущей силы (ПЭДС) относительно оси втулки. Целесообразно определить его как критерий качества собираемости системы «вал – втулка» и функцию отклика для многофакторного анализа, зависящую от технологических несовершенств. Одним из наиболее существенных факторов является неперпендикулярность торцевых поверхностей главной оси изделия. Другим существенным фактором является погрешность приложения движущей силы. Необходимо оценить накопленный уровень несовершенств, их расположение и форму. Цель работы состоит в создании математических моделей сборки многоступенчатой ракеты контейнерного типа, учитывающих начальные отклонения отсеков.

Изложение основного материала исследования

Наиболее существенным отклонением является неперпендикулярность торцевых поверхностей главной оси, проходящей через центры тяжести торцов изделия. Это приводит к искривлению конструкции, состоящей из некоторого числа цилиндрических обечаек. Отклонение определяется максимальным углом α между торцевой плоскостью и плоскостью, перпендикулярной оси цилиндра, и углом φ , определяющим ориентацию неперпендикулярности в прямоугольной системе координат, связанной с торцевой поверхностью.

Сборка конструкции производится с помощью тянущей силы, направленной с некоторым отклонением относительно осей вала и втулки. Это отклонение является другим существенным фактором, влияющим на результаты технологического процесса.

Пусть заданы следующие системы координат (рис. 1):

– $O_1X_1Y_1Z_1$ – система координат, связанная с системой координат втягивающей силы. Начало системы координат расположено в центре канавки барабана тянущей лебедки. Оси O_1X_1 и O_1Y_1 перпендикулярны оси O_1Z_1 , ось O_1Z_1 направлена вдоль канавки барабана лебедки;

– $O_2X_2Y_2Z_2$ – система координат, связанная со втулкой. Начало системы координат расположено в центре левого торца втулки. Ось O_2Z_2 направлена по продольной оси втулки. Оси O_2X_2 , O_2Y_2 ей перпендикулярны;

– $O_3X_3Y_3Z_3$ – система координат, связанная с контрольной стойкой. Начало системы координат расположено в центре контрольной стойки. Ось O_3Z_3 направлена по оси трубы. Оси O_3X_3 , O_3Y_3 ей перпендикулярны;

– $O_4X_4Y_4Z_4$ – система координат, связанная с главной продольной осью вала. Начало системы координат расположено в центре левого торца вала. Ось O_4Z_4 направлена по продольной оси вала. Ось O_4X_4 направлена в сторону максимума отклонения левого торца вала. Ось O_4Y_4 ей перпендикулярна.

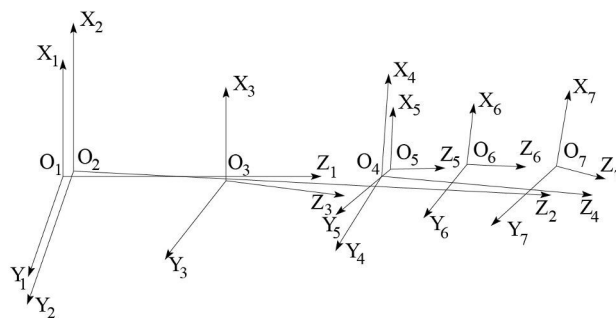


Рис. 1. Система координат втягивающей силы, втулки, стойки, вала

Вал состоит из частей $L_i, i \in \overline{1, n}$. Введем прямоугольную систему координат $O_iX_iY_iZ_i$, жестко связанную с элементом L_i . Ось O_iZ_i направлена по продольной оси элемента L_i ;

– $O_5X_5Y_5Z_5$ – система координат, связанная с левым торцом L_1 . Начало системы координат расположено в центре левого торца L_1 . Ось O_5Z_5 направлена по продольной оси L_1 . Оси O_5X_5 , O_5Y_5 лежат в плоскости, ей перпендикулярной;

– $O_6X_6Y_6Z_6$ – система координат, связанная с левым торцом L_2 . Начало системы координат расположено в центре левого торца L_2 . Ось O_6Z_6 направлена по продольной оси L_2 . Оси O_6X_6 , O_6Y_6 лежат в плоскости, ей перпендикулярной.

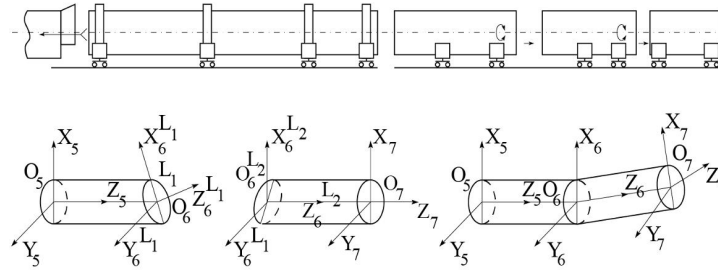


Рис. 2. Схема стыковки ступеней и оболочек с несовершенствами

дикулярной;

– $O_7X_7Y_7Z_7$ – система координат, связанная с левым торцом L_2 . Начало системы координат расположено в центре левого торца L_2 . Ось O_7Z_7 направлена по продольной оси L_3 . Оси O_7X_7 , O_7Y_7 лежат в плоскости, ей перпендикулярной.

После стыковки вал образует единое целое (рис. 2).

Системы координат $O_6^L X_6^L Y_6^L Z_6^L$ и $O_6^{L_2} X_6^{L_2} Y_6^{L_2} Z_6^{L_2}$ совпадают, образуя единую систему $O_6 X_6 Y_6 Z_6$ (верхними индексами обозначена принадлежность систем частям вала). Для нахождения параметров положения главной оси и углов неперпендикулярности правого торца необходимо привести координаты точек O_7 и A , заданных в системе $O_6 X_6 Y_6 Z_6$, к системе $O_5 X_5 Y_5 Z_5$.

Далее, необходимо перейти от связанной с торцом L_1 системы координат $O_5 X_5 Y_5 Z_5$ к системе координат $O_4 X_4 Y_4 Z_4$, связанной с главной осью вала. Необходимо определить углы неперпендикулярности крайнего правого торца вала относительно главной оси в связанной с нею системе координат (рис. 3).

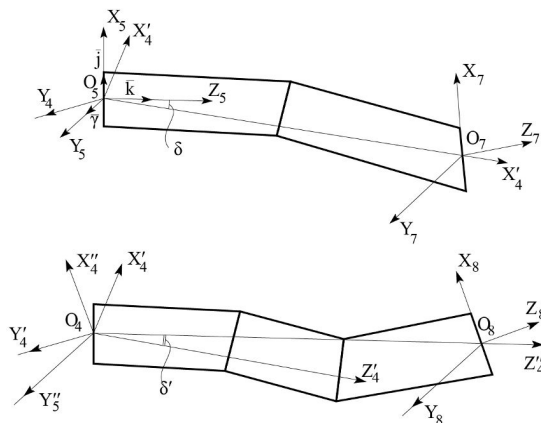


Рис. 3. Система координат главной оси вала

В результате изложенных операций две части вала представляют собой единое целое – вал со своей главной осью и неперпендикулярностью крайнего правого торца. Поэтому можно повторить данные преобразования, присоединяя последовательно третий, четвертый, i -й элементы вала. Затем необходимо перейти от системы координат, связанной с главной осью вала, к системе координат, связанной с контрольной стойкой, а также необходимо перейти от систем координат, связанных с источником тянущей силы и втулкой, к системе координат, связанной с контрольной стойкой (рис. 1).

Для нахождения углов неперпендикулярности правого торца в системе координат, связанной с главной продольной осью вала, необходимо найти координаты ортов системы $O_4 X_4 Y_4 Z_4$ в системе $O_5 X_5 Y_5 Z_5$. Для этого необходимо найти соответствующую матрицу вращения [5].

Для решения данной задачи используются матричные математические преобразования пространства.

Ортогональное линейное преобразование вида $x' = A \cdot x$ для матрицы, описывающей собственное (вокруг оси) вращение $A = \|a_{ij}\|_{i,j=1}^3$ в

трехмерном евклидовом пространстве, является перемещением, инвариантным по отношению к величине и взаимному расположению векторов. Операция вращения изменяет положение радиус-вектора x каждой точки евклидового пространства на угол поворота δ вокруг направленной оси вращения, точки которой инвариантны. Угол поворота δ и направляющие косинусы $\{c_i\}_{i=1}^3$ оси вращения определяются формулами:

$$\cos \delta = 0,5(a_{11} + a_{22} + a_{33} - 1);$$

$$c_i = 0,5(a_{kj} - a_{jk}) / \sin \delta;$$

$$i \rightarrow j \rightarrow k(kurl) \tag{1}$$

так что $\delta > 0$ соответствует вращению правого винта, вворачиваемого в направлении положительной оси вращения. Либо знак угла δ , либо положительное направление оси вращения могут выбираться произвольно. Направление положительной оси вращения – это направление собственного вектора $\sum_{i=1}^3 c_i e_i$ для произвольного ортонормированного базиса $\{e_i\}_{i=1}^3$, соответствующего собственному значению $+1$ оператора приведения матрицы A к диагональному виду. Соответствующая значениям δ и $\{c_i\}_{i=1}^3$ вращению матрица преобразования A имеет вид:

$$A = \cos \delta \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} + \sin \delta \begin{vmatrix} 0 & -c_3 & c_2 \\ c_3 & 0 & -c_1 \\ -c_2 & c_1 & 0 \end{vmatrix} + (1 - \cos \delta) \begin{vmatrix} c_1^2 & c_1 c_2 & c_1 c_3 \\ c_1 c_2 & c_2^2 & c_2 c_3 \\ c_1 c_3 & c_2 c_3 & c_3^2 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

т. е. векторы x, x' и $\sum_{i=1}^3 c_i e_i$ являются правой системой.

Пусть система координат $O_i X_i Y_i Z_i$ совпадает с осью i -й части вала, тогда путем вращения плоскости XOY на угол φ вокруг положительного направления оси OZ система займет положение промежуточной системы координат $O_i'' X_i'' Y_i'' Z_i''$ и ось $O_i'' X_i''$ расположится в плоскости, проведенной через ось координат и максимум неперпендикулярности торца.

Рассмотрим частный случай с учетом неперпендикулярности только правых торцов частей вала.

Соотношения, связывающие координаты некоторой точки K в системе координат $O_i'' X_i'' Y_i'' Z_i''$ и $O_i X_i Y_i Z_i$, имеют вид:

$$O_i'' K_i'' = M_{-\varphi} \cdot O_i K_i;$$

$$O_i K_i = (x, y, z)^T;$$

$$O_i'' K_i'' = (x'', y'', z'')^T.$$

Поворот на угол φ векторов в данном базисе осуществляется с помощью матрицы перехода $M_{-\varphi}$:

$$M_{-\varphi} = \begin{vmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Для того чтобы система координат разместилась в плоскости торца с учетом неперпендикулярности, необходимо плоскость промежуточной системы $O_i'' X_i'' Y_i'' Z_i''$ повернуть вокруг положительного направления оси $O_i'' Y_i''$ на угол α . При этом ось Z изменяет направление в пространстве в зависимости от неперпендикулярности торца так, что $O_i' K_i' = M_{-\alpha} \cdot O_i'' K_i''$, где $O_i' K_i' = (x', y', z')^T$, $O_i'' K_i'' = (x'', y'', z'')^T$. Аналогично предыдущему повороту:

$$M_{-\alpha} = \begin{vmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Матрица перехода

$$O_i' K_i' = M_{-\alpha} \cdot O_i'' K_i'' = M_{-\alpha} \cdot M_{-\varphi} \cdot O_i K_i = A_{-\alpha-\varphi} \cdot O_i K_i$$

имеет вид:

$$A_{-\alpha-\varphi} = \begin{vmatrix} \cos \alpha \cos \varphi & \cos \alpha \sin \varphi & \sin \alpha \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ \sin \alpha \cos \varphi & \sin \alpha \sin \varphi & \cos \alpha \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Расчет координат центра правого торца $(X_1 Y_1 Z_1)$ в новой системе производится из системы:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x \cos \alpha \cos \varphi + y \cos \alpha \sin \varphi + z \sin \alpha, \\ y_1 &= -x \sin \varphi + y \cos \varphi, \\ z_1 &= x \sin \alpha \cos \varphi + y \sin \alpha \sin \varphi + z \cos \alpha \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Перейдем к вычислению углов неперпендикулярности относительно главной оси собранного вала.

Направление вектора главной оси вала известно: координатами его конечной точки являются, полученные ранее, координаты правого торца вала в новой системе (X_1, Y_1, Z_1) .

Переход от старой системы координат к новой осуществляется с помощью преобразований типа вращения. При этом, в соответствии с рис. 4, угол поворота пространства определяет

ся как угол между двумя совмещаемыми после преобразования векторами K и Z_4 в соответствии с формулой $\cos \delta = z / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

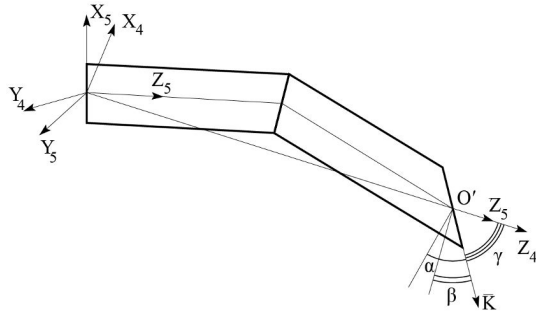


Рис. 4. Схема углов поворота сечения

Направление оси вращения определяется из условия её перпендикулярности к плоскости, в которой лежат оба вектора. Ось вращения находим как векторное произведение векторов K и Z_4 как:

$$(0, 0, 1) \times (x, y, z) = i(-y) + j(x) + k(0) = -i \cdot y + j \cdot x.$$

Таким образом, новое положение оси вращения определяется следующими параметрами [5]: $c_1 = -y, c_2 = x, c_3 = 0$.

Матрица вращения имеет вид:

$$A = \cos \delta \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} + \sin \delta \begin{vmatrix} 0 & 0 & x \\ 0 & 0 & y \\ x & y & 0 \end{vmatrix} + (1 - \cos \delta) \begin{vmatrix} y^2 & -yx & 0 \\ yx & x^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Тогда координаты повернутых базисных векторов (ξ, η, ζ) в исходной системе будут иметь вид $\xi = A \cdot i, \eta = A \cdot j, \zeta = A \cdot k$, а новые углы неперпендикулярности β (угол между перпендикуляром к главной оси и плоскостью крайнего правого торца) и γ (угол между вектором Z_4 главной оси и вектором K плоскости крайнего правого торца) определяются из условия $\cos \beta = \sin \gamma = \sqrt{1 - \cos^2 \delta}$ (рис. 3).

Зная координаты векторов Z_4 и K и, используя формулу векторного произведения, на-

ходим угол между ними из уравнения:

$$\cos \gamma = \frac{(x, y, z) \begin{pmatrix} x + |K| \cos \varphi, y + |K| \sin \varphi, z + |K| \sin \varphi \end{pmatrix}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \sqrt{(x + |K| \cos \varphi)^2 + (y + |K| \sin \varphi)^2 + (z + |K| \sin \varphi)^2}}. \quad (8)$$

Для нахождения нового угла разворота неперпендикулярности в полученном базисе строится вектор P (рис. 5).

Рассмотрим $P_n = P_x + k_2$, где (i_2, j_2, k_2) – орты новой повернутой системы координат. Угол между P_n и ортом i_2 определяются из соотношения:

$$\cos \varphi = P_n \cdot i_2 / |P_n| |i_2|. \quad (9)$$

Из рис. 5 видно, что новый угол разворота неперпендикулярности $\varphi_n = \varphi' + \pi/2$. Это следует из того, что проекция вектора P на плоскость $X_4 O Y_4$ лежит также в плоскости $P O Z_4$ и, следовательно, ортогональна вектору P_n .

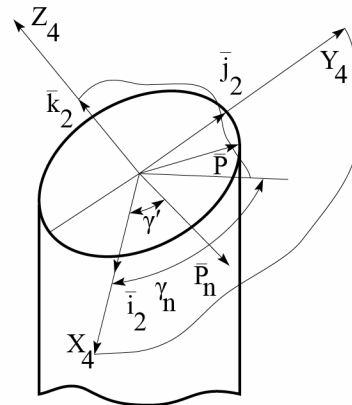


Рис. 5. Схема осей сечения

Рассмотренный выше частный случай может быть обобщен для произвольной неперпендикулярности торцов. Рассмотрим стыковку двух частей, каждая из которых имеет неперпендикулярность по стыкуемым торцам (рис. 6).

Если разбить их некоторым образом так, чтобы правая часть не имела неперпендикулярности по торцу, и их главные оси сохранили

Параметры технологических отклонений ступеней и контейнера

Наименование	Смещение центра масс вала		Смещение опор вала		Эксцентриситет оси		Перекос оси		Отклонение поверхности втулки	Смещение осевой силы		Эксцентриситет осевой силы	
	по x	по y	по x	по y	вала	втулки	вала	втулки		по x	по y	по x	по y
Код	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}
Единицы измерения	мм	мм	мм	мм	мм	мм	рад	рад	мм	мм	мм	мм	мм
Диапазон	± 4	± 3	± 3	$\pm 2,35$	± 1	± 1	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	1÷4	$\pm 1,5$	$\pm 1,3$	$\pm 7,5$	± 7

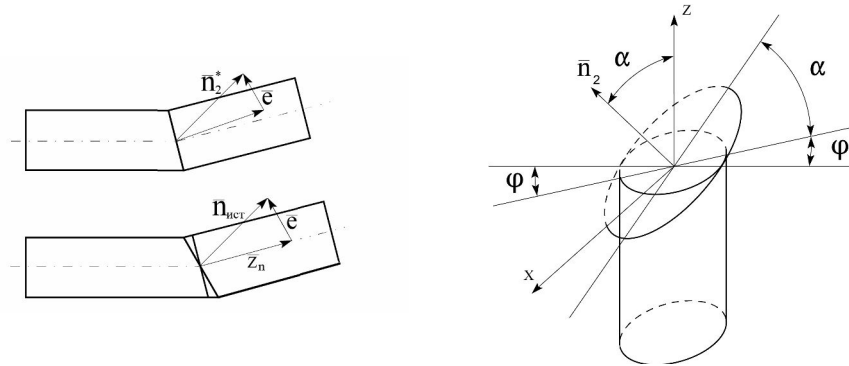


Рис. 6. Схема поворота осей сечения

свое положение, то получим рассмотренный частный случай.

Таким образом, необходимо найти углы неперпендикулярности левой обечайки. Исходя из общего выражения для компонент единичной внешней нормали к торцу в случае неперпендикулярности, получим:

$$n = n(-|n| \sin \alpha_2 \sin \varphi_2, |n| \sin \alpha_2 \cos \varphi_2, |n| \cos \varphi_2). \quad (10)$$

Приведенный алгоритм позволяет определить величину выбранного критерия качества.

Для приведенного в таблице набора несовершенств был реализован имитационный эксперимент. Розыгрыш случайной матрицы эксперимента при нормальном распределении параметров в указанных диапазонах задавались по методике, описанной в [2]. Каждый из факторов варьировался в 60 строках имитированного эксперимента. Расчет значения ПЭДС производился аналитически с учетом отклонений ступеней. Дисперсия воспроизводимости рассчитывалась по методике объединения линейно зависимых строк при выборочном коэффициенте парной корреляции $r = 0,7$.

Получена адекватная стандартизованная модель ($F_{\text{эсп}} = 2,97 < 3,0 = F_{\text{табл}}$) для 8 факторов вида:

$$y^0 = 0,38x_3^0 + 0,45x_4^0 + 0,57x_5^0 - 0,51x_7^0 + 0,34x_8^0 - 0,50x_{10}^0 + 0,61x_{11}^0 - 0,32x_{13}^0. \quad (11)$$

Выводы

Построенная по имитационным данным регрессионная модель отражает реальный технологический процесс и хорошо согласуется с физическими представлениями о процессе формирования ПЭДС. Модель позволяет проводить оптимизацию технологического процесса в зависимости от рассматриваемых несовершенств, и была использована в АСУ ТП сборки составных оболочек для ракет контейнерного базирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Технология производства космических ракет: учебник / Е.А. Джур, С.И. Вдовин, Л.Д. Кучма и др. – Днепропетровск: ДГУ, 1992. – 184 с.*
2. *Мильцын А.М., Олевский В.И. Прогнозирование несущей способности цилиндрических оболочек с технологическими несовершенствами: монография. – Днепропетровск: Наука та Освіта, 2011. – 453 с.*
3. *Кушнер В.С., Верещака А.С., Схиртладзе А. Г. Технологические процессы в машиностроении: учебник. – М.:*

Академия, 2011. – 413 с.

4. *Тарасов В.А., Кашиба Л.А.* Теоретические основы технологии ракетостроения: учебник под ред. В. А. Тарасова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 352 с.

5. *Олевский В.И.* Математическое моделирование оболочечных конструкций с отклонениями: монография. – Днепропетровск: Маковецкий, 2014. – 382 с.

Поступила в редакцию 05.10.2016

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗБІРКИ СКЛАДЕНОЇ ОБОЛОНКИ

Олевський В.І., Олевська Ю.Б., Шапка І.В.

Збірка є заключним етапом виготовлення машин, що акумулює накопичені на попередніх етапах недосконалості. Для складеної оболонки багатоступеневих ракет контейнерного базування існуючий рівень відхилень відсіків часто призводить до вибракування виробу через перевищення габаритних розмірів і граничних значень складальних зусиль. Поєднання конструкції по лінійним базам на виробництві налагоджено, а за кутовими викликає труднощі і вимагає додаткових витрат. Метою даного дослідження є створення математичної моделі збірки складеної оболонки, яка враховує початкові відхилення відсіків. Завданням дослідження є розробка методики імітаційного моделювання та ідентифікації параметрів математичної моделі залежності габаритних розмірів і розвороту виробу від параметрів початкового відхилення відсіків. На основі аналізу конструкції методами аналітичної геометрії і регресійного аналізу створена нова методика комп'ютерного моделювання складених оболонок з відхиленнями. Для набору недосконалостей, виявленого за результатами дослідження реального технологічного процесу, проведено імітаційний експеримент. Здійснено розіграш випадкової матриці експерименту при нормальному розподілі параметрів в реальних діапазонах їх зміни. Результатом дослідження є методика імітаційного експерименту, а також отримана на її основі регресійна модель збірки для 8 факторів. Модель добре узгоджується з фізичними уявленнями про технологічний процес і дозволяє проводити оптимізацію технологічного процесу. Вона була використана в автоматизованій системі управління технологічним процесом складання ракет контейнерного базування.

Ключові слова: багатфакторна модель, багатоступенева ракета, збірка, автоматизована система управління.

MATHEMATICAL MODELING OF COMPOSITE SHELL ASSEMBLY

Olevskiy V.I., Olevska Yu.B., Shapka I.V.

Assembly is the final stage of manufacturing machines, accumulating imperfections of the previous stages. For the composite shell of multistage container-based missiles, the existing level of deviation of the compartments often results in the culling of the product due to exceeding the overall dimensions and the limiting values of the assembly efforts. The alignment of the structure on linear bases in the production is fine-tuned, but on the angular bases causes difficulties and requires additional costs. The purpose of this study is to create a mathematical model for assembling a composite shell that takes into account the initial deviations of the compartments. The task of the study is to develop a methodology for simulation and identification of parameters of a mathematical model for the dependence of the overall dimensions and the turn of the product on the parameters of the initial deviation of the compartments. Based on the analysis of the design using analytical geometry and regression analysis, a new method for computer simulation of composite shells with deviations was created. For a set of imperfections, revealed by the results of the real technological process, an imitation experiment was carried out. A random experiment matrix was drawn during the normal distribution of parameters in real ranges of their variation. The result of the study is the technique of the simulation experiment, as well as the regression model of the assembly obtained according to it, which is based on 8 factors. The model is in good agreement with the physical concepts of the technological process and allows optimizing the technological process. It was used in an automated control system for the technological process of building container-based missiles.

Keywords: multifactor model, multistage rocket, assembly, automated control system.

*Рахманов С.Р.***МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СТЕРЖНЯ ОПРАВКИ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ****Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр**

Рассмотрена задача о параметрических колебаниях для выбранной модели системы «труба – оправка – стержень» механизма удержания оправки стана холодной пильгерной прокатки труб (ХПТ). Разработана расчетная схема и составлено дифференциальное уравнение движения изображающей точки стержня оправки стана ХПТ. Проведено комплексное исследование динамики стержня механизма удержания оправки стана ХПТ. Параметрические процессы механизма удержания оправки стана представлены системой дифференциальных уравнений, в виде уравнений Матье-Хилла. Установлены области динамической устойчивости механизма удержания оправки и построена карта параметрической устойчивости механической системы. Математическая модель динамических процессов достоверно описывает параметрические явления в механизме и определяет амплитудно-частотные характеристики стержневой системы за время реализации всего технологического процесса пильгерной прокатки трубы на стане ХПТ. Результаты моделирования динамических процессов указывают на необходимость снижения колебаний стержня оправки стана ХПТ до допустимого уровня виброактивности системы. Математическое моделирование процессов пильгерной прокатки трубы-заготовки позволяет, на этапе проектирования технологических процессов, прогнозировать показатели разностенности готовых труб и назначать рациональные режимы эксплуатации стана ХПТ. Применение модернизированных центрователей на упругом основании, установленных со стороны механизмов подачи и поворота трубы-заготовки в очаг деформации стана ХПТ, приводит к стабилизации динамических процессов и повышению качества готовых труб. Достигнуто заметное снижение продольной и поперечной разностенности труб путем обеспечения устойчивости оправки в очаге деформации. Увеличение стойкости элементов механизма удержания стержня оправки обеспечивается в результате стабилизации уровня виброактивности системы.

Ключевые слова: стан, холодная прокатка, оправка, стержень, жесткость, поворот, подача, труба, сила прокатки, колебания, динамика, математическая модель, дифференциальное уравнение, устойчивость.

Постановка проблемы

Технологические процессы на станах холодной прокатки труб (ХПТ) предусматривают периодическую прокатку трубы-заготовки в калибрах валков подвижной рабочей и на оправке, которая удерживается на оси прокатки посредством стержневой системы, стационарных центрователей и упорно-регулирующего клинового механизма в очаге деформации [1].

Фирма SMS-Меег (Германия), начиная с конца семидесятых годов, а ОАО «ЭЗТМ» и АКХ «ВНИИМЕТМАШ» с конца девяностых

годов стали выпускать высокоскоростные современные станы различных типоразмеров с торцевой загрузкой трубы-заготовки.

Станы ХПТ последних моделей снабжены механизмами, которые, по требованию технологического процесса, могут осуществлять двойную подачу и двойной поворот. Некоторые высокоскоростные станы, например, стан КРВ 18 НМРК фирмы SMS-Меег, имеют возможность совершать так называемую непрерывную подачу трубы-заготовки и непрерывный поворот трубы со стержнем оправки. Указанная непрерыв-

ность механической системы стана в данном случае носит чисто условный характер. Поскольку рабочий конус всегда зажат валками во время прокатки, то практически повернуть и подавать трубу-заготовку вперед невозможно. С другой стороны, при высокой быстроходности стана, например, при частоте движения рабочей клетки равной 350 мин^{-1} , время открытия зева подачи или зева поворота калибра составляет тысячные доли секунды.

При включении приводов механизмов подачи и поворота на постоянное вращение все элементы кинематической цепи от двигателя до рабочего конуса в рабочих фазах движения валков испытывают определенную упругую деформацию, а при переходе валков в фазы холостого хода эту упругую деформацию реализуют в виде нежелательной подачи и поворота рабочего конуса, освобожденного калибрами.

Высокочастотное чередование рабочих и холостых фаз разворота валков и калибра в комплексе зрительно создают видимость непрерывности подачи и поворота.

С момента разработки технологии пильгерновой прокатки труб и создания первых станов ХПТ известны два способа загрузки очередной трубы-заготовки в стан по линии прокатки – боковой и торцевой. Некоторые первые образцы зарубежных станов имели торцевую загрузку, однако в силу некоторых причин превалировала боковая, как конструктивно более простая. Кроме того, повышение требований к качеству поверхности труб, особенно внутренней, стимулировало боковую загрузку, поскольку при каждой загрузке очередной заготовки имелась возможность осмотра оправки с целью контроля налипания металла или появления трещин, что в период частых вариаций режимами обжатий (калибровками) и использования технологических смазок, является более приемлемым.

Недостатки боковой загрузки трубы-заготовки, кроме потери производительного времени (для перезарядки нужно остановить прокатку, извлечь и снова через полость очередной заготовки вернуть оправку в рабочий конус), отрицательно влияют на качество прокатываемых труб, особенно на точность размеров (по длине всей трубы). Дело в том, что для извлечения оправки из конуса его необходимо обкатать, т.е. произвести несколько двойных ходов клетки при выключенной подаче. В результате обкатки толщина стенки рабочего конуса, по сравнению с остальной частью трубы, подвергается утончению.

Кроме того, повышенные требования к точ-

ности размеров труб стали соизмеримыми с изменением размеров инструментов под действием их теплового расширения. В связи с этим остановки стана на перезарядку стали нежелательными, поскольку приводили к местному утончению стенки за счет обкатки и местному изменению размеров труб за счет изменения размеров технологических инструментов, вызванных нежелательным охлаждением во время остановки.

Названные недостатки и наличие современной элементной базы побудили изготовителей вернуться на новом качественном уровне к модернизации существующих, разработке и изготовлению новых современных станов ХПТ с системой торцевой загрузки трубы-заготовки.

На схеме (рис. 1,а) показан первый вариант (этап) торцевой загрузки трубы-заготовки, реализованный, например, на стане KPW25VMR фирмы SMS-Meeg. Загрузка трубы-заготовки 1 начинается после открытия заднего патрона стержня оправки 7 путем надевания ее на стержень 4 и перемещения до переднего 5 закрытого патрона стержня. Далее, закрывается патрон стержня и открывается передний патрон стержня (без остановки прокатки). Патрон поворота и подачи заготовки 5, находящийся в переднем положении своего хода, освобождает место очередной заготовке, которая трайбаппаратом или толкателем подается за патрон стержня 7. Патрон поворота и подачи трубы-заготовки 5 индивидуальным сервоприводом ускоренно возвращается назад. В это время процесс прокатки останавливается, поскольку из-за отвода патрона поворота и подачи заготовки 5 прекратилась подача. При этом может быть остановлен главный привод.

Далее, пропустив заготовку через себя (при открытых кулачках), патрон поворота и подачи заготовки 5 останавливается у заднего конца заготовки, происходит реверс его движения, он захватывает заготовку своими кулачками и продвигает ее до упора в торец недокатанной предыдущей заготовки. После этого включается подача и главный привод, если он был отключен, и продолжается процесс прокатки.

Рассматриваемый вариант предусматривает остановку процесса пильгерновой прокатки на время отвода патрона заготовки из переднего в заднее положение на длину очередной трубы-заготовки. При отключении главного привода обкатка рабочего конуса не происходит, стабильность теплового режима металла и инструмента нарушается за счет паузы в процессе прокатки.

Второй вариант реализации процесса хо-

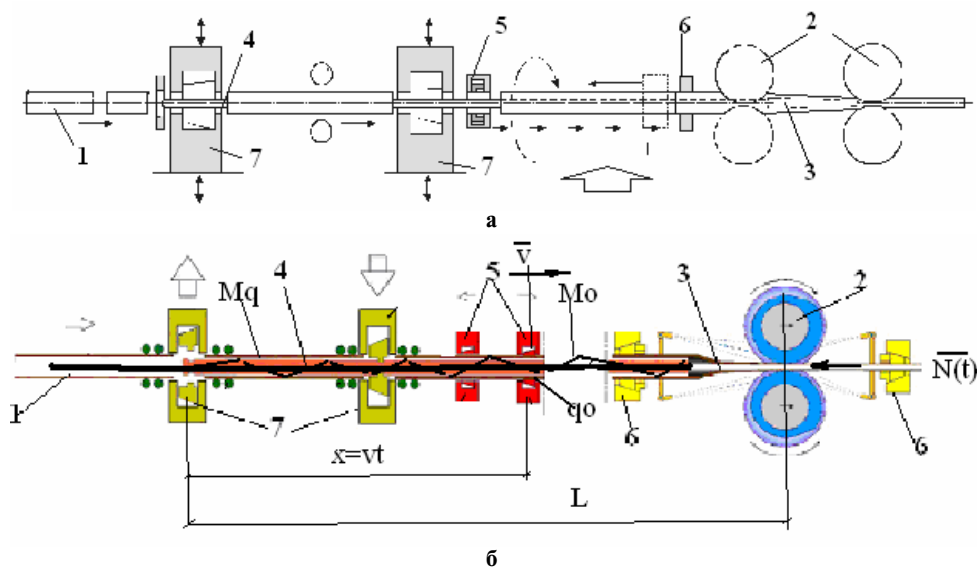


Рис. 1. Стан холодной пильгерной прокатки труб с осевой загрузкой трубных заготовок и расчетная схема механизма удержания оправки стана ХПТ б): 1 – трубная заготовка (гильза); 2 – валки рабочие; 3 – оправка; 4 – стержень оправки; 5 – патроны подачи трубы; 6 – патроны поворота трубы; 7 – патроны удержания стержня оправки

лодной пильгерной прокатки (рис. 1,б) отличается тем, что механизм подачи и поворота состоит из двух патронов подачи и поворота заготовки, каждый из которых захватывает заготовку не за задний конец, а за наружную поверхность. Патроны поворота и подачи работают каждый в своей зоне ответственности (по длине трубы-заготовки).

Первый патрон подачи и поворота 5, пройдя свой рабочий участок, уступает процесс подачи и поворота трубы-заготовки второму патрону подачи и поворота, а за время его работы занимает исходное положение для очередного перехвата трубы-заготовки. Процесс прокатки при этом не прерывается. Очередная заготовка подается трайбаппаратом с подпором в торец прокатываемой заготовки до тех пор, пока она не будет захвачена механизмом подачи и поворота, работающего безостановочно, чем и достигается непрерывность процесса прокатки.

Такая работа двух патронов подачи и поворота создает условия для непрерывности процесса прокатки, что устраняет отмеченные выше недостатки боковой и торцевой загрузки по первому варианту. Непрерывный процесс прокатки реализован, например, на стане последней модели фирмы SMS-Meer. Похожее решение реализовано на отечественных станах ХПТ, последних моделей (например, стан ХПТ 6-20 АКХ «ВНИИМЕТМАШ»).

Опыт эксплуатации высокоскоростных стан-ов ХПТ как отечественных, так и зарубежных

производителей показывают, что дальнейшая интенсификация технологических процессов пильгерной прокатки труб и повышение качества обрабатываемого на станах продукта преимущественно обусловлены особенностями динамики механизмов стан-ов (в частности механизма удержания оправки на оси прокатки трубы).

На устойчивые условия формирования процесса пильгерной прокатки трубы отрицательно влияют как виброактивность оборудования со стороны механизмов периодического поворота и подачи трубы-заготовки в стан ХПТ, так и в частности колебания системы «труба» заготовка – оправка – стержень».

Виброактивность систем механизма удержания стержня оправки во многом определяет условия формирования геометрии готовых труб и приводит к существенному снижению стойкости базового оборудования линии стана ХПТ [2]. На оправку и стержень, с некоторой циклическостью загрузки трубы-заготовки в очаг деформации стана, действуют определенные статические и большие динамические нагрузки. Это в ряде случаев приводит к неожиданной потере устойчивости стержня оправки в пределах упругости механической системы. Согласно условиям, изложенным в работе [3], уход оправки от расчетного положения обуславливает проявление неконтролируемой разностенности готовых труб.

Формулирование цели исследования

Обеспечение динамической устойчивости стержня оправки в очаге деформации требует исключения определенных условий и режимов пильгерной прокатки труб, обуславливающих возникновение различного рода нежелательных параметрических колебательных явлений в рассматриваемой механической системе.

Исследованию механизмов поворота и подачи стана ХПТ посвящены ряд теоретических и экспериментальных работ [3–4], где дается определенный анализ сил, действующих на стержень оправки, указаны возможные условия ухода оправки от расчетного положения рабочего конуса и приведены условия возникновения зон неустойчивого функционирования механизма удержания оправки.

Поскольку данные работы охватывают лишь исследования различных моделей очага деформации, механических систем рабочей клетки, поворотного-подающего комплекса и не касаются вопросов динамики механизма удержания оправки, то комплексное исследование параметрической устойчивости стержня представляется актуальным.

В данной работе рассмотрены результаты исследования параметрической устойчивости стержня механизма удержания оправки стана ХПТ с учетом нестационарного воздействия со стороны очага деформации и прокатываемой трубы, что отличает ее от известных решений [5–6].

Расчетная схема рассматриваемой динамической системы выбрана с учетом технологических особенностей пильгерной прокатки, что отражает воздействие усилия прокатки, инертные характеристики системы и распределенную нагрузку трубы-заготовки, перемещающейся вдоль стержня со скоростью подачи в очаг деформации V (рис. 1,б).

Приведенная расчетная схема достаточно близка к реальному технологическому процессу прокатки на стане ХПТ с осевой загрузкой трубы-заготовки в линию стана и очевидно глубже отображает динамические явления во всех системах механизма удержания стержня оправки [4].

Изложение основного материала исследования

Рассматриваемые поперечные колебания стержня механизма удержания оправки стана ХПТ, следуя принятой расчетной схеме (рис. 1) согласно [6], описываются дифференциальным уравнением:

$$EI_z \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + m_0 \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + N(t) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \begin{cases} q(x,t), & 0 \leq x \leq vt; \\ 0, & vt < x \leq \ell, \end{cases} \quad (1)$$

где $y(x,t)$ – динамический прогиб стержня механизма удержания оправки стана ХПТ; EI_z – изгибная жесткость стержня оправки; $q(x,t)$ – интенсивность нагружения стержня прокатываемой трубой-заготовкой; m_0 – погонная масса стержня оправки; v – скорость подачи трубы в очаг деформации стана по циклу прокатки трубы.

Дифференциальное уравнение поперечных колебаний (1) для рассматриваемой динамической модели механизма удержания оправки составлено с учетом инерции стержня оправки, изменяющегося осевого составляющего силы прокатки и интенсивности воздействия прокатываемой трубы.

При некоторых допущениях принимаем во внимание то, что частота изменения силы прокатки с некоторыми допущениями совпадает с частотой изменения разностенности трубы-заготовки. Следовательно, есть достаточное основание предполагать, что в первом приближении можно принять условия, описанные в работе [3–4]. Многочисленные экспериментальные исследования энергосиловых параметров стана ХПТ 32 показывают, что осевая составляющая силы прокатки, действующая на стержневую систему носит преимущественно периодический характер и соответствует принятому гармоническому закону:

$$N(t) = N_0 + N_1 \cos(\omega t), \quad (2)$$

где N_0 – статическая составляющая силы прокатки гильзы на стане; N_1 и ω – соответственно динамическая составляющая силы пильгерной прокатки гильзы и частота ее изменения.

Тогда дифференциальное уравнение поперечных колебаний стержня оправки (1) с учетом (2) перепишется в виде:

$$EI_z \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + m_0 \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + (N_0 + N_1 \cos(\omega t)) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \begin{cases} q(x,t), & 0 \leq x \leq vt; \\ 0, & vt < x \leq \ell. \end{cases} \quad (3)$$

Решение дифференциального уравнения движения стержня механизма удержания оправки стана запишем в виде разложения в ряд Фурье по фундаментальным функциям задачи с учетом синусоидальной формы поперечных колебаний системы:

$$y(x,t) = \sum_{k=1}^n f_k(t) \sin\left(\frac{k\pi x}{\ell}\right), \quad (4)$$

где $f_k(t)$ – искомая функция времени, подлежащая определению в ходе решения задачи;

$\sin\left(\frac{k\pi x}{\ell}\right)$ – фундаментальная синусоидальная функция поперечных колебаний шарнирно закрепленного по концам стержня оправки; ℓ – приведенная длина стержня оправки стана.

Для решения дифференциального уравнения вынужденных колебаний механической системы (3) распределенную нагрузку $q(x,t)$, воздействующую в процессе пильгерной прокатки со стороны трубы-заготовки на стержень, аналогично раскладываем тоже в ряд Фурье. Отметим, что фундаментальные функции для стержня оправки в наиболее распространенной в литературе [5–6] форме имеют вид:

$$q(x,t) = \sum_{k=1}^n b_k \sin\left(\frac{k\pi x}{\ell}\right); \quad b_0 = 0, \quad (5)$$

где принято во внимание условие, что интенсивность распределенной нагрузки прокатываемой трубы-заготовки определено есть нечетная функция $q(x,t) = -q(-x,t)$.

После разложения распределенной нагрузки (5) в ряд и выполнения процедуры интегрирования окончательно находим:

$$b_k = \frac{2q_0}{k\pi} \left(1 - \cos\left(\frac{k\pi \nu t}{\ell}\right)\right). \quad (6)$$

Применив алгоритм решения задачи, согласно процедуре Бубнова-Галеркина [6], учитывая свойство ортогональности форм собственных колебаний стержня, подставляем (6) в правую часть дифференциального уравнения (3). Опустив соответствующие знаки суммы, окончательно интегрируя полученное, после преобразований дифференциальное уравнение движения стержня оправки стана представим в виде:

$$\frac{EI \left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^4 + (N_0 + N_1 \cos(\omega t)) \left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^2}{m_0} f_k(t) + \frac{d^2 f_k(t)}{dt^2} = \frac{2q_0}{k\pi m_0} \left[1 - \cos\left(\frac{k\pi \nu t}{\ell}\right)\right]. \quad (7)$$

Для удобства анализа параметрических явлений и исследования динамических процессов в рассматриваемой механической системе стана ХПТ, дифференциальные уравнения поперечных колебаний стержня оправки (9) далее представим в форме классических задач динамической устойчивости деформируемых систем.

Обозначая частоту колебаний стержня оправки в виде Ω_k , введя другие общепринятые в литературе параметры:

$$\omega_k^2 = \left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^4 \frac{EI}{m_0}; \quad N_k = \left(\frac{k\pi}{\ell}\right)^2 EI_z; \quad \Omega_k = \omega_k \sqrt{1 - N_0/N_k} \quad (8)$$

в уравнение (7), согласно [6], соответственно получаем:

$$\frac{d^2 f_k(t)}{dt^2} + \omega_k^2 \left[1 - \frac{N_0 + N_1 \cos(\omega t)}{N_k}\right] f_k(t) = \frac{2q_0}{k\pi m_0} \left[1 - \cos\left(\frac{k\pi \nu t}{\ell}\right)\right], \quad (9)$$

где N_k – эйлерова критическая сила; ω_k – частота свободных поперечных колебаний стержня оправки.

После подстановки параметров принятой динамической модели системы и упрощений дифференциальных уравнений (9) получаем уравнения в виде классических уравнений Матъе-Хилла. Данные уравнения удовлетворяют начальным условиям задачи в постановке Коши, граничным условиям поставленной задачи и обобщенной математической модели системы:

$$\frac{d^2 f_k(t)}{dt^2} + \Omega_k^2 [1 - 2\mu_k \cos(\omega t)] f_k(t) = \frac{2q_0}{k\pi m_0} \left[1 - \cos\left(\frac{k\pi \nu t}{\ell}\right)\right]; \quad k = 1, \bar{n}, \quad (10)$$

где Ω_k – частота свободных колебаний стержня оправки, нагруженного статической составляющей усилия прокатки P_0 трубы-заготовки

на стане ХПТ; $\mu_k = \frac{N_1}{2[N_k - N_0]}$ – коэффициент

динамического возбуждения стержня оправки стана ХПТ.

Коэффициент динамического возбуждения μ_k и частота свободных колебаний стержня оправки Ω_k определяются из условия взаимного изменения, как технологических параметров очага деформации при пильгерной прокатке, так и параметров стержня оправки стана ХПТ.

Дифференциальное уравнение (10) составлено и представлено в виде известных параметрических уравнений Матье-Хилла. Полученная математическая модель с достаточно высокой степенью точности и корректно описывает динамику механизма удержания оправки стана ХПТ. Численное решение дифференциального уравнения (10) реализовано методом Рунге-Кутты с применением программного продукта Matcad, что позволяет оценить динамические перемещения изображающей точки стержня оправки для одной из наиболее распространенных гармонических форм колебаний механизма удержания оправки.

Кривые, приведенные на рис. 2 и рис. 3, наиболее полно описывают динамические процессы, происходящие в системе механизма удержания оправки стана ХПТ разных типоразмеров без учета (1) и с учетом (2) опыта использования группы роликовых центрователей.

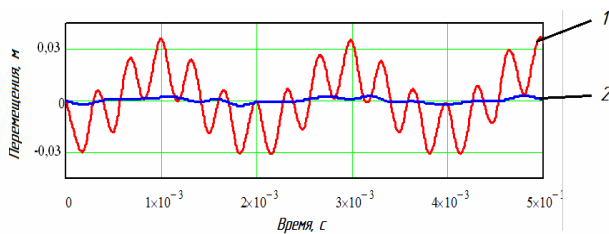


Рис. 2. Параметрические колебания стержня оправки высокоскоростного стана KPW 25VMR без центрователей 1) и с центрователями 2) (труба заготовка диаметром 19x1,2, сталь 12X18H10T)

Карта устойчивости стержня оправки стана ХПТ при поперечных колебаниях механической системы, согласно [6–7] и уравнению (10), представлена на рис. 4 в виде классической параметрической диаграммы Айнса-Стретта.

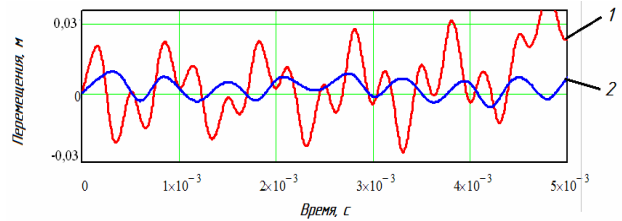


Рис. 3. Параметрические колебания стержня оправки отечественного стана ХПТ 15-45 без центрователей 1) и с роликовыми центрователями 2) (заготовка диаметром 25x1,6, титан Gr2)

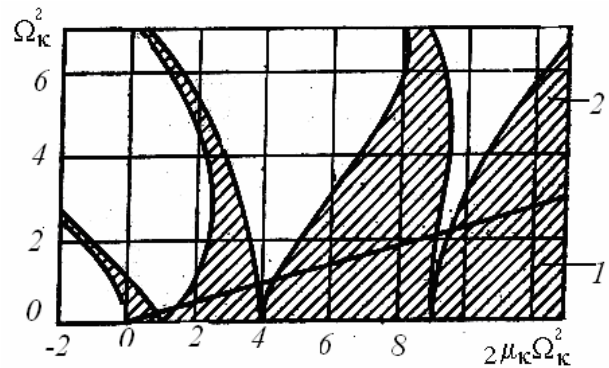


Рис. 4. Диаграмма параметрической устойчивости Айнса-Стретта для обобщенной динамической модели стержня оправки стана ХПТ: 1 – зоны динамической устойчивости стержня оправки; 2 – зоны динамической неустойчивости системы

Математическая модель системы с высокой степенью достоверности описывает виброактивность системы и существенно уточняет поведение стержня оправки станов ХПТ.

Диаграмма устойчивости функционирования стержня оправки для рассматриваемой обобщенной динамической модели колебаний системы позволяет проанализировать реальные области параметрической устойчивости стержня оправки стана ХПТ и оценить поведение самой оправки в очаге деформации и может быть использовано при назначении режимов прокатки трубы-заготовки.

Выбор рациональных режимов пильгерной прокатки трубы-заготовки на стане ХПТ следует осуществить с помощью карты устойчивости (заштрихованные области). Очевидно, что учет интенсивности воздействия прокатываемой трубы-заготовки, подаваемой со скоростью V в очаг деформации, является определяющим параметром в рамках выбранной динамической модели стержневой системы механизма удержания оп-

равки стана ХПТ.

Возможность моделирования режимов пильгерной прокатки гильз на этапе проектирования технологических процессов существенно отличает полученные результаты от результатов ранее известных работ в области исследования динамической устойчивости и виброактивности стержневой системы механизма удержания оправки станом ХПТ.

Следует отметить, что изменение конструкции крепления стержня оправки в каретке упорно-регулирующего механизма посредством клинового механизма приводит к некоторой стабилизации уровня виброактивности стержня и систем удержания оправки стана ХПТ.

Для обеспечения динамической устойчивости механической системы рекомендуем на высокоскоростном стане ХПТ использовать центrovатели (люнеты) стержневой системы механизма удержания оправки конструкции ООО «НПФ «Восток Плюс» регулируемой жесткости в количестве не менее семи штук. Центрирующие суппорта оснащены четырьмя удлиненными роликами (рабочая длина одного ролика на одном суппорте должна быть не менее 100–120 мм), расположенными в шахматном порядке по вертикали и рычажным механизмом пропорционального сближения роликов по оси прокатки. Усилия прижатия роликов к стержню или трубе-заготовке обеспечиваются давлением в гидроцилиндре привода рычагов.

Выводы

Проведено исследование динамики стержня механизма удержания оправки стана ХПТ. Математическая модель задачи представлена дифференциальными уравнениями вынужденных колебаний системы «труба – оправка – стержень» в виде уравнений параметрической устойчивости Матъе-Хилла.

Математическая модель динамических процессов достоверно описывает параметрические явления в механизме и определяет амплитудно-частотные характеристики стержневой системы за время реализации всего технологического процесса пильгерной прокатки трубы на стане ХПТ. Результаты моделирования динамических процессов указывают на необходимость снижения виброактивности систем стержня оправки стана ХПТ до допустимого уровня колебаний в очаге деформации.

Математическое моделирование процессов пильгерной прокатки трубы-заготовки позволяет, на этапе проектирования технологических процессов, прогнозировать показатели разно-

стенности готовых труб и назначать рациональные режимы эксплуатации стана ХПТ.

Применение модернизированных центrovателей на упругом основании, установленных со стороны механизмов подачи и поворота трубы-заготовки в очаг деформации стана ХПТ, приводит к стабилизации динамических процессов и повышению качества готовых труб. Достигнуто заметное снижение продольной и поперечной разностенности труб путем обеспечения устойчивости оправки в очаге деформации.

Увеличение стойкости элементов механизма стержня системы удержания оправки обеспечивается в результате стабилизации уровня виброактивности системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холодная прокатка труб / З.А. Кофф, П.М. Соловейчик, В.А. Алешин, М.И. Гриншпун. – Свердловск: Металлургиздат, 1962. – 431 с.
2. Гриншпун М.И., Соколовский В.И. Станы холодной прокатки труб. – М.: Машиностроение, 1967. – 239 с.
3. *Технология* трубного производства: Учебник для вузов / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Интермет – Инжиниринг, 2002. – 640 с.
4. Фролов В.Ф., Данченко В.Н., Фролов Я.В. Холодная пильгерная прокатка труб. – Днепропетровск: Пороги, 2005. – 255 с.
5. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. – М.: Гостехиздат, 1956. – 630 с.
6. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний. – М.: ГНТИ, 1957. – 546 с.

Поступила в редакцию 05.10.2016
Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Ахундов В.М.

**МОДЕЛЮВАННЯ КОЛИВАНЬ СТЕРЖНЯ
ОПРАВЛЕННЯ СТАНУ ХОЛОДНОЇ ПІЛЬГЕРНОЇ
ПРОКАТКИ ТРУБ****Рахманов С.Р.**

Розглянуто задачу про параметричні коливання для обраної моделі системи «труба – оправлення – стержень» механізму утримання оправки стану холодної пільгерної прокатки труб (ХПТ). Розроблено розрахункову схему і складено диференціальне рівняння руху яка відображає точки стержня оправлення стану ХПТ. Проведено комплексне дослідження динаміки стержня механізму утримання оправки стану ХПТ. Параметричні процеси механізму утримання оправки стану представлені системою диференціальних рівнянь, у вигляді рівнянь Мат'є-Хілла. Встановлено області динамічної стійкості механізму утримання оправки і побудована карта параметричної стійкості механічної системи. Математична модель динамічних процесів достовірно описує параметричні явища в механізмі і визначає амплітудно-частотні характеристики стержневої системи за час реалізації всього технологічного процесу пільгерної прокатки труби на стані ХПТ. Результати моделювання динамічних процесів вказують на необхідність зниження коливань стержня оправлення стану ХПТ до допустимого рівня віброактивності системи. Математичне моделювання процесів пільгерної прокатки труби-заготовки дозволяє, на етапі проектування технологічних процесів, прогнозувати показники різностінності готових труб і призначати раціональні режими експлуатації стану ХПТ. Застосування модернізованих центровачів на пружній основі, встановлених з боку механізмів подачі і повороту труби-заготовки в осередок деформації стану ХПТ, призводить до стабілізації динамічних процесів і підвищення якості готових труб. Досягнуто помітне зниження поздовжньої і поперечної різностінності труб шляхом забезпечення стійкості оправлення в осередку деформації. Збільшення стійкості елементів механізму утримання стержня оправлення забезпечується в результаті стабілізації рівня віброактивності системи.

Ключові слова: стан, холодна прокатка, оправлення, стержень, жорсткість, поворот, подача, труба, сила прокатки, коливання, динаміка, математична модель, диференціальне рівняння, стійкість.

**MODELING OF VIBRATIONS OF MANDREL BAR IN
COLD PILGER MILL****Rakhmanov S.R.**

The problem of parametric oscillations for the selected model of the «tube-mandrel-rod» system of the mechanism for retaining the mandrel of the cold pipe-rolling mill (HPT) is considered. A design scheme has been developed and a differential equation of motion of the representative point of the mandrel bar of the mandrel of the HPT mill has been compiled. A complex study of the dynamics of the rod of the mechanism for retaining the mandrel of the HPT mill is carried out. Parametric processes of the holding mechanism of the mandrel mill are represented by a system of differential equations, in the form of Mathieu Hill equations. The regions of dynamic stability of the retaining mechanism of the mandrel are established and a map of the parametric stability of the mechanical system is constructed. The mathematical model of dynamic processes reliably describes parametric phenomena in the mechanism and determines the amplitude-frequency characteristics of the rod system during the time of realization of the entire technological process of pellet rolling of the pipe at the HPT mill. The results of simulation of dynamic processes indicate the need to reduce the oscillations of the mandrel bar of the CPT mill to the permissible level of the system's vibroactivity. Mathematical modeling of the process of pellet rolling of the pipe-billet allows, at the design stage of technological processes, to predict the indices of the difference in finished pipes and to assign rational operating conditions for the HPT mill. The use of modernized aligners on an elastic base, installed from the side of the mechanisms of feeding and turning of the billet pipe into the center of deformation of the HPT mill, leads to the stabilization of the dynamic processes and the improvement of the quality of the finished pipes. A significant decrease in the longitudinal and transverse differences in the pipes was achieved by ensuring the stability of the mandrel in the deformation zone. The increase in the durability of the elements of the mechanism of retention of the mandrel bar is ensured as a result of stabilization of the vibroactivity level of the system.

Keywords: camp, cold rolling, mandrel, core, rigidity, turn, giving, pipe, force of rolling, fluctuation, loudspeaker, mathematical model, differential equation, stability.

*Стебляно П.О., Дьомічев К.Е.***ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ТІЛ ПІД ДІЄЮ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

Дніпродзержинський державний технічний університет, м. Кам'янське

Робота присвячена чисельному моделюванню стану пружно-пластичних циліндричних тіл під дією високотемпературних навантажень. Розроблено ітераційний метод покомпонентного розщеплення для розв'язання систем диференціальних рівнянь, що описують процеси теплопровідності і деформування в нелінійних складених циліндричних тілах для чисельного моделювання їх пружно-пластичної поведінки під впливом температурного і силового навантаження. При цьому використано апроксимаційний апарат напружених сплайнів і кубічних В-сплайнів, який дозволяє враховувати складні залежності властивостей матеріалу від термомеханічних процесів. Авторами було досліджено температурне поле циліндричного тіла, яке знаходиться у вертикальному положенні і під кутом, а також всі необхідні елементи тензорів напруги і деформації. Наведені результати мають більш високий порядок точності в порівнянні з аналогічними результатами, отриманими за допомогою різницевого методу. Отримані результати дозволяють прогнозувати довговічність і надійність об'єктів, що працюють в умовах шоккових нестационарних температурних навантажень. Запропоновано ефективний чисельний метод для розв'язання тривимірних нестационарних задач термомеханіки, заснований на зведенні задачі до системи трьох послідовно розв'язуваних двовимірних задач, коли невідомі величини представлені у вигляді двовимірних поліноміальних і напружених сплайнів. Побудовані ітераційні формули для визначення температури, швидкостей зміщень, компонентів тензорів напруги і деформації, дозволяють отримувати третій порядок методу апроксимації за часом і третій та четвертий порядок за координатами.

Ключові слова: термомеханічні процеси, температурне поле, метод покомпонентного розщеплення, сплайни, математичне моделювання, ітераційні методи.

Постановка проблеми

Деталі та елементи металургійних конструкцій в процесі створення та експлуатації перебувають під сукупною дією складного нестационарного силового і температурного навантаження. Нерівномірне високотемпературне навантаження тіл у поєднанні з силовими чинниками призводить до складних процесів деформування. Для моделювання поведінки елементів металургійних конструкцій, які перебувають під дією високотемпературних навантажень, потрібно визначати нестационарний термомеханічний стан тіла не лише на пружній стадії деформування, а й за межею пружності з урахуванням термомеханічних параметрів матеріалу, які залежать від температури.

Найвні чисельні методи розв'язання таких

нестационарних задач призводять, як правило, до великих обчислювальних труднощів, пов'язаних з вирішенням великих систем алгебраїчних рівнянь, що не завжди бувають ефективні. Ці обставини суттєво ускладнюють моделювання пружно-пластичних циліндричних тіл під дією високотемпературного та силового навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема математичного моделювання термомеханічних процесів в пружно-пластичних циліндричних тілах при складних навантаженнях є не новою та комплексною. Тому, такій проблематиці присвячено багато робіт, зокрема: сучасні уявлення про закономірності взаємовпливу нестационарних процесів різної фізичної природи можна знайти в роботах Я.Й. Бу-

рак, Р.М. Кушнір, В.Г. Карнаухова та ін.; конкретним моделям визначення, дослідження та оптимізації механічної поведінки тіл при комплексних зовнішніх навантаженнях присвячені роботи В.Г. Баженова, А.Р. Гачкевича, Д.В. Грілицького, В.С. Поповича, Р.С. Мусія та ін.; ефективні чисельні і чисельно-аналітичні методи вирішення нестационарних задач механіки запропоновані в роботах В.Ф. Мейша, О.О. Стрельнікової, Я.М. Григоренка, В.І. Кузьменка та ін.

Формулювання мети дослідження

Незважаючи на вищевикладене, з нашої точки зору, в науковій літературі не приділялось достатньої уваги математичним моделям і методам, які сприяють підвищенню точності визначення і дослідження нестационарного термомеханічного стану циліндричних тіл при високотемпературному та силовому навантаженні, коли термомеханічні параметри матеріалу залежать від температури. Метою роботи є розробка чисельного методу на базі апарата сплайн-функцій для моделювання пружно-пластичного стану циліндричного тіла під дією високотемпературних навантажень.

Виклад основного матеріалу дослідження

Температурне поле для ізотропного тіла у випадку врахування тепла, що виділяється в процесі його деформування під дією температурного та силового навантаження, визначається шляхом розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності при певних початкових і граничних умовах [1,3,5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \left\{ \frac{\partial}{\partial \alpha^1} \left(a \frac{H_2 H_3}{H_1} \cdot \frac{\partial T}{\partial \alpha^1} \right) + \right. \\ & + \frac{\partial}{\partial \alpha^2} \left(a \frac{H_1 H_3}{H_2} \cdot \frac{\partial T}{\partial \alpha^2} \right) + \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial \alpha^3} \left(a \frac{H_2 H_1}{H_3} \frac{\partial T}{\partial \alpha^3} \right) \right\} + W_*, \end{aligned} \quad (1)$$

де W_* – функція розсіювання або питома потужність внутрішніх джерел теплоти; $a = \frac{\lambda(T)}{c_v \rho}$ – ізохорна температуропровідність, яка для термочутливих матеріалів залежить від температури і потребує окремого математичного моделювання; H_i – параметри Ляме ($i=1, 2, 3$); \cdot – точкою позначені похідні за часом; α^i – ортогональні криволінійні координати:

$$\begin{aligned} W_* = & S_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{2G} S_{ij} \dot{S}_{ij} + \\ & + \frac{\sigma_{ii}}{3} \left(\dot{\epsilon}_{ij} - 3\alpha_T \frac{\partial T}{\partial t} \right) - \frac{\sigma_{ii}}{3K} \dot{\sigma}_{ij}, \\ S_{ij} = & \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma, \quad \epsilon_{ij} = \epsilon_{ij} - \delta_{ij} \epsilon \\ \sigma = & \frac{\sigma_{ii}}{3}; \quad \epsilon = \frac{\epsilon_{ii}}{3}; \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}; \quad K = \frac{3E}{1-2\nu}. \end{aligned} \quad (2)$$

Тут S_{ij} , ϵ_{ij} – відповідно, дівіатори тензорів напруг і деформацій; σ_{ij} , ϵ_{ij} – тензори напруги і деформації.

Початковий розподіл температури в тілі, що відповідає природному ненапруженому стану тіла, задається так:

$$T = T_0(\alpha^i) \quad \text{при} \quad t = 0. \quad (3)$$

Граничні умови, які відображають вплив навколишнього середовища на температуру тіла, задаються в такий спосіб:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(T - \theta) - q, \quad (4)$$

де n – зовнішня нормаль до поверхні тіла; α_T – коефіцієнт лінійного теплового розширення; α – коефіцієнт теплообміну; Q – температура навколишнього середовища; q – тепловий потік.

У загальному випадку величини a , Q , q можуть залежати від часу й положення точки ($\alpha^1, \alpha^2, \alpha^3$) на поверхні тривимірного тіла V . Умова (4) при різних значеннях коефіцієнта a містить три види граничних умов. Граничні умови першого роду полягають у тому, що на поверхні тіла в кожний момент часу заданий розподіл температури ($\alpha \rightarrow \infty, q=0$). Граничні умови другого роду задають тепловий потік q через поверхню тіла ($\alpha=0, q \neq 0$). Граничні умови третього роду формулюють закон теплообміну між поверхнею тіла й навколишнім середовищем при заданій величині θ ($q=0, \alpha \neq 0$) [2].

Окрім температури в кожній точці тіла треба знайти зміщення точок тіла u_i (або їх швидкості v_i) і тензори напруги та деформації.

Для створення математичної моделі пружно-пластичних циліндричних тіл під дією температурного та силового навантаження необхідно більш детально розглянути: геометричні співвідношення та рівняння руху елемента пруж-

но-пластичного циліндричного тіла, моделі фізичних співвідношень термопружності та термопластичності [1].

Математична модель пружно-пластичних циліндричних тіл під дією температурного та силового навантаження являє собою систему 16-ти диференціальних рівнянь в частинних похідних, яка складається з рівняння теплопровідності (1), що описує температурне поле, в якому врахована можливість виділення тепла за рахунок температурних навантажень за межею пружності, а також рівнянь руху елемента тіла, що являють термонапруженодеформований стан тіла, геометричні співвідношення для швидкостей деформацій і фізичні співвідношення, що зв'язують складові тензорів напруги та деформації.

Повну систему рівнянь запропонованої моделі записано в векторній формі:

$$\frac{\partial \vec{W}}{\partial t} = \sum_{i=1}^2 A_i \frac{\partial \vec{W}}{\partial \alpha_i} + \vec{B}, \quad (5)$$

де \vec{W} – вектор, компонентами якого будуть швидкості зміщень, компоненти тензорів напруги та деформації.

Система розв'язується на основі методу покомпонентного розщеплення.

Для розв'язання системи (5) пропонується метод чисельного визначення розв'язку нестационарної задачі термомеханіки для циліндричних тіл. Для подальшого застосування МПР системи (5) можна переписати в циліндричних координатах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{W}}{\partial t} &= A_1 \frac{\partial \vec{W}}{\partial r} + \frac{2}{3} \vec{B}, \quad t \in \left[t_p; t_{p+\frac{1}{3}} \right], \\ \frac{\partial \vec{W}}{\partial t} &= A_2 \frac{\partial \vec{W}}{r \partial \varphi}, \quad t \in \left[t_{p+\frac{1}{3}}; t_{p+\frac{2}{3}} \right], \\ \frac{\partial \vec{W}}{\partial t} &= A_3 \frac{\partial \vec{W}}{\partial z} + \frac{1}{3} \vec{B}, \quad t \in \left[t_{p+\frac{2}{3}}; t_{p+1} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Це дозволяє одержати порядок $O(t^\tau)$, де $\tau = 2; 2,5$ відповідно для кубічних В-сплайнів і напружених сплайнів.

На відміну від чисто різницевого підходу,

похідну за часом будемо апроксимувати за допомогою сплайнів:

$$W_m(a^n, t) = \sum_{r=0}^3 \Phi_r(\eta) W_m \left(a^n, t_{p+\frac{r}{3}} \right), \quad (7)$$

$$\text{де } \eta = \frac{1}{\tau} (t - t_p), \quad t \in [t_p, t_p + \tau].$$

Продиференціюємо (4) за часом:

$$\frac{\partial W_m(a^n, t)}{\partial t} = \frac{3}{\tau} \sum_{r=0}^3 f_r(\eta) W_m \left(a^n, t_{p+\frac{r}{3}} \right). \quad (8)$$

Функції $\Phi_r(\eta), f_r(\eta)$ задаються в залежності від типу використаних сплайн-функцій. При переході від рівнянь до різницевої схеми їх похідні за часом розв'язки у вузлах $t_{p+r/3}, r=1, 2, 3$ визначаються за допомогою формул (4), а похідні за координатами замінюються відповідними апроксимаціями.

У випадку застосування явної схеми МПР при $t_1 = t_2 = t_3 = t/3$ розрахункову схему можна записати так:

$$\begin{aligned} f_3 \left(\frac{1}{3} \right) W_m^{p+1} + f_2 \left(\frac{1}{3} \right) W_m^{p+\frac{2}{3}} + f_1 \left(\frac{1}{3} \right) W_m^{p+\frac{1}{3}} &= L_{1m}, \\ f_3 \left(\frac{2}{3} \right) W_m^{p+1} + f_2 \left(\frac{2}{3} \right) W_m^{p+\frac{2}{3}} + f_1 \left(\frac{2}{3} \right) W_m^{p+\frac{1}{3}} &= L_{2m}, \\ f_3(1) W_m^{p+1} + f_2(1) W_m^{p+\frac{2}{3}} + f_1(1) W_m^{p+\frac{1}{3}} &= L_{3m}. \end{aligned} \quad (9)$$

де $W_m^{p+\frac{s}{3}} = W_m \left(a^n, t_{p+\frac{s}{3}} \right)$, а також L_{im} – складова

наведених нижче векторів $\vec{L}_i (i=1,2,3; m=1,2,\dots,15)$.

$$\begin{aligned} \vec{L}_1 &= \frac{\tau}{3} \left[\lambda_1 \vec{W}^p + \frac{2}{3} \vec{W}^p \right] - f_0 \left(\frac{1}{3} \right) \vec{W}^p, \\ \vec{L}_2 &= \frac{\tau}{3} \left[\lambda_2 \vec{W}^{p+\frac{1}{3}} + \frac{2}{3} \vec{W}^p \right] - f_0 \left(\frac{2}{3} \right) \vec{W}^p, \\ \vec{L}_3 &= \frac{\tau}{3} \left[\lambda_3 \vec{W}^{p+\frac{1}{3}} + \frac{1}{3} \vec{W}^p \right] - f_0(1) \vec{W}^p. \end{aligned} \quad (10)$$

У квадратних дужках формул (9) стоять вирази, що є правими частинами формул явної схеми. Особливістю системи (8) є те, що до правих частин її рівнянь за допомогою L_{2m}, L_{3m} входять величини $W_{\lambda}^{p+\frac{1}{3}}, W_{\lambda}^{p+\frac{2}{3}}$, де $l=1, 2, \dots, 15$.

Перетворимо систему (5). Для цього з третього рівняння знайдемо W_{λ}^{p+1} :

$$W_{\lambda}^{p+1} = \frac{1}{f_3(1)} \left\{ L_{3m} - f_1(1)W_m^{p+\frac{1}{3}} - f_2(1)W_m^{p+\frac{2}{3}} \right\} \quad (11)$$

Якщо виключити величину W_{λ}^{p+1} з першого та другого рівнянь системи (8), то одержимо систему, на основі якої можна організувати ітераційну процедуру визначення проміжних величин $W_{\lambda}^{p+\frac{1}{3}}$ та $W_{\lambda}^{p+\frac{2}{3}}$ на дробових кроках за часом:

$$\begin{aligned} a_1 \left(W_m^{p+\frac{1}{3}} \right)_j + a_2 \left(W_m^{p+\frac{2}{3}} \right)_j = \\ = (c_{1m})_{j-1} b_1 \left(W_m^{p+\frac{1}{3}} \right)_j + b_2 \left(W_m^{p+\frac{2}{3}} \right)_j = (c_{2m})_{j-1}, \end{aligned} \quad (12)$$

де j – номер ітерації, а також введені позначення для відомих сталих.

Нульове наближення для величин $\left(W_m^{p+\frac{1}{3}} \right)_0$

та $\left(W_m^{p+\frac{2}{3}} \right)_0$ визначається за допомогою формул,

отриманих на основі явної схеми МПР.

Після цього обчислюються всі $c_{1r}, c_{2r}, r=1, 2, \dots, 15$. Перша та всі наступні ітерації

$\left(W_m^{p+\frac{1}{3}} \right)_j$ та $\left(W_m^{p+\frac{2}{3}} \right)_j$, де $j=1, 2, \dots$, визначаються

з системи (12). Її розв'язок:

$$\begin{aligned} \left(W_m^{p+\frac{1}{3}} \right)_j &= \hat{\lambda}_1 L_{1m} + \hat{\lambda}_2 (L_{2m})_{j-1} + \hat{\lambda}_3 (L_{3m})_{j-1}, \\ \left(W_m^{p+\frac{2}{3}} \right)_j &= \hat{\lambda}_4 L_{1m} + \hat{\lambda}_5 (L_{2m})_{j-1} + \hat{\lambda}_6 (L_{3m})_{j-1}. \end{aligned} \quad (13)$$

Якщо застосовуються кубічні В-сплайни, то:

$$\hat{\lambda}_1 = \frac{23}{12}, \hat{\lambda}_2 = \frac{4}{3}, \hat{\lambda}_3 = \frac{5}{12}, \hat{\lambda}_4 = \frac{7}{3}, \hat{\lambda}_5 = -\frac{2}{3}, \hat{\lambda}_6 = \frac{1}{3}.$$

У випадку застосування напружених сплайнів:

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_1 &= 1.9949, \hat{\lambda}_2 = -1.4058, \hat{\lambda}_3 = 0.4109, \\ \hat{\lambda}_4 &= 2.4058, \hat{\lambda}_5 = -0.7367, \hat{\lambda}_6 = 0.3309. \end{aligned}$$

Процес ітерації за допомогою формул (12) проводиться доти, поки розходження між сусідніми ітераціями не досягне значення наперед заданої величини. Після цього на основі формули (10) визначається розв'язок векторного рівняння W_m^{p+1} на повному кроці за часом.

Чисельні результати

Авторами було досліджено [2,4,6] температурне поле циліндричного тіла, яке знаходиться в вертикальному положенні (рис. 1,а) та під кутом (рис. 1,б), а також всі необхідні елементи тензорів напруги та деформації.

Циліндр, розташований під кутом 60° до поверхні, заповнюється рідиною (розплавом металу) з температурою $T=1536^\circ C$ зі швидкістю проступання в тіло τ .

Запишемо початкові $T=T_0=150^\circ C$ та граничні умови: для $r=425$, де $z \in [0; 3110]$.

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (14)$$

На внутрішній поверхні циліндра граничні умови залежать від часу та від кута нахилу циліндра до поверхні землі. Так, на тій частині внутрішньої поверхні, яка вже залита рідиною, задається значення температури: $T=1536^\circ C$, а на ще вільній від рідини внутрішній поверхні ви-

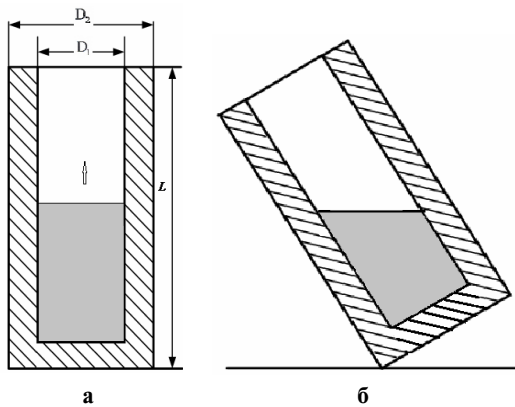


Рис. 1. Схема заповнення рідиною пружно-пластичного циліндричного тіла: а – циліндр заповнюється рідиною (розплавом металу); б – циліндричне тіло заповнюється рідиною під кутом

конуються умови (14).

Автори в роботах [2,6] для знаходження температурного поля пружно-пластичного тіла скористалися методом дробових кроків. Частинні похідні по координатам були апроксимовані за допомогою сплайн-функцій.

При чисельному розв'язанні застосована наступна просторова сітка:

$$w_h = \left\{ \begin{array}{l} (r_i, \varphi_0, z_k); r_i = r_{i-1} + h_1, r_0 = 247, i = 1, 2, \dots, 5, \\ \varphi_j = \varphi_{j-1} + jh_2, \varphi_0 = 0, j = 1, 2, \dots, 24, \\ z_k = z_{k-1} + h_3, z_0 = 0, k = 1, 2, \dots, 100 \end{array} \right\}$$

де $h_1 = 35,6$; $h_2 = \pi/12$; $h_3 = 31,1$.

Замінивши відповідні диференціальні оператори відповідними різницевиими виразами, розрахуємо у кожному вузлі часової сітки:

$$W_r = \left\{ \begin{array}{l} t^p; t^{p+\frac{1}{3}} = t^p + \tau_1; t^{p+\frac{2}{3}} = t^{p+\frac{1}{3}} + \tau_2, \\ t^{p+1}; t^{p+\frac{2}{3}} = t^p + \tau_3; t_0 = 0, p = 0, 1, 2, \dots \end{array} \right.$$

Замінивши відповідні диференціальні оператори відповідними різницевиими операторами, обчислимо у кожному вузлі сітки в три дробові кроки – спершу на третій частині, потім на двох третях і потім на повному кроці за часом.

Зафіксуємо стан циліндричного тіла в момент, коли температурне навантаження зайняло усі вузли по $i=1$ і розрахуємо температурне поле. Результати розрахунку температурного поля при розрахунковому кроці за часом 0,1,

приведені на рис. 2. Деякі результати полів температури, швидкостей напруження і деформації наведено на рис. 2, рис. 3 та таблиці. Порівняємо їх з результатами для циліндра, який знаходиться на площині у вертикальному положенні (рис. 3, пунктирна лінія – циліндр розташований під кутом).

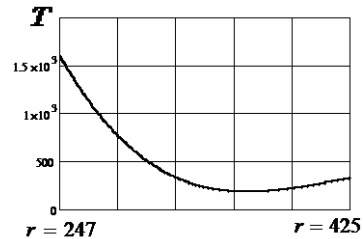


Рис. 2. Температурне поле в пружно-пластичному циліндричному тілі

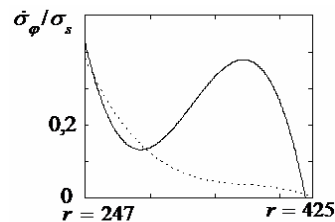


Рис. 3. Поле швидкостей напруження в пружно-пластичному циліндричному тілі

Поле швидкостей деформації в пружно-пластичному циліндричному тілі $\dot{\sigma}_{\varphi 1} / \sigma_{\tau}$ – циліндр знаходиться вертикально, $\dot{\sigma}_{\varphi 2} / \sigma_{\tau}$ – циліндр знаходиться під кутом

r	247	291,5	336	380,5	425
$\dot{\sigma}_{\varphi 1} / \sigma_{\tau}$	0,420	0,125	0,120	0,120	0,012
$\dot{\sigma}_{\varphi 2} / \sigma_{\tau}$	0,420	0,124	0,040	0,010	0,010

Аналіз полів швидкості напруження і швидкості деформації показує, що при температурному навантаженні пружно-пластичного циліндричного тіла, яке знаходиться горизонтально, швидкість напруження рівномірно спадає по перерізу тіла, а швидкість деформації спадає і стабілізується до 0,01. Авторами було досліджено [2–3,6], що в пружно-пластичному циліндричному тілі, що знаходиться під кутом, поле швидкості напруження змінюється хвилеподібно, це призводить до стабілізації поля швидкостей деформації раніше, але відношення швидкостей деформації є значно вищим і дорівнює 0,12. Отже, надмірна швидкість навантаження, і температурний удар не дають можливості про-

явити матеріалам циліндричного тіла пластичні властивості.

Наведені результати мають вищий порядок точності в порівнянні з аналогічними результатами, отриманими за допомогою різницевого методу. Отримані результати дають змогу прогнозувати довговічність і надійність об'єктів, які працюють в умовах шоків нестационарних температурних навантажень.

Висновки

В роботі розглянута математична модель стану пружно-пластичних циліндричних тіл під дією високотемпературних навантажень, яка дозволяє враховувати залежності термомеханічних параметрів матеріалу від температури.

Запропоновано ефективний чисельний метод для розв'язання тривимірних нестационарних задач термомеханіки, який базується на зведенні задачі до системи трьох послідовно розв'язуваних двовимірних задач, коли невідомі величини представлені у вигляді двовимірних поліноміальних та напружених сплайнів. Побудовані ітераційні формули для визначення температури, швидкостей зміщень, компонентів тензорів напружки та деформації, дозволяють отримувати третій порядок методу апроксимації за часом та третій і четвертий порядок по координатам.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стеблянюк П.А. Пространственные нестандартные задачи теории термоупругопластичности для составных тел: дис... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.04. — К.: Ин-т механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины, 1996. — 273 с.
2. Стеблянюк П.О., Дьомічев К.Е. Моделирование поля напружения та деформації при нестационарному температурному навантаженні циліндричних тіл // Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия «Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве», Днепропетровск. — 2014. — Вип.76. — С. 262–270.
3. Pavel A. Steblyanko, Konstantin E. Dyomichev Application of Fractional Steps Method for Determining the Stress and Strain Field during the Temperature Load of Cylindrical Bodies // DOI 10.12851/EESJ201501C06ART06. Eastern European Scientific Journal. ISSN 2199-7977 Ausgabe 1. — 2015, P. 138–147.
4. Дьомічев К.Е. Про достовірність теоретичних розрахунків для деяких деталей машин, які працюють в умовах підвищених температур // Вісник ЧДТУ: Збірник наук. праць. Серія «Технічні науки». — Черкаси, 2015. — Вип. №1. — С. 130–135.
5. Стеблянюк П.О., Дьомічев К.Е. Математичне моделювання пружно-пластичних циліндричних тіл з урахуван-

ням нелінійного характеру деформування // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем: Збірник доп. І Всеукр. науково-техн. конф. — Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ. — 2015 — ч. 1. — С. 66–68.

6. Стеблянюк П.А., Волосова Н.Н., Дьомічев К.Е. Застосування методу дробових кроків для визначення поля напруження та деформації при температурному навантаженні циліндричних тіл // Математичні проблеми технічної механіки: Збірник наук. праць. Тематичний випуск. — Дніпродзержинськ: Дніпродзержинський державний техн. унів-т, 2012. — Вип. 2. — С. 78–85.

Надійшла до редакції 13.10.2016

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Ляшенко Ю.О.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРУЗОК

Стеблянюк П.А., Демичев К.Э.

Работа посвящена численному моделированию состояния упруго-пластических цилиндрических тел под действием высокотемпературных нагрузок. Разработан итерационный метод покомпонентного расщепления для решения систем дифференциальных уравнений, описывающих процессы теплопроводности и деформирования в нелинейных составленных цилиндрических телах для численного моделирования их упруго-пластического поведения под влиянием температурной и силовой нагрузки. При этом использовано аппроксимационный аппарат напряженных сплайнов и кубических В-сплайнов, который позволяет учитывать сложные зависимости свойств материала от термомеханических процессов. Авторами было исследовано температурное поле цилиндрического тела, которое находится в вертикальном положении и под углом, а также все необходимые элементы тензоров напряжения и деформации. Приведенные результаты имеют более высокий порядок точности по сравнению с аналогичными результатами, полученными с помощью разностного метода. Полученные результаты позволяют прогнозировать долговечность и надежность объектов, работающих в условиях шоковых нестационарных температурных нагрузок. Предложен эффективный численный метод для решения трехмерных нестационарных задач термомеханики, основанный на сведении задачи к системе трех последовательно решаемых двумерных задач, когда неизвестные величины представлены в виде двумерных полиномиальных и напряженных сплайнов. Построенные итерационные формулы для определения температуры, скоростей смещений, компонент тензоров напряжения и деформации, позволяют получить третий порядок метода аппроксимации по времени и третий, и четвертый порядок по координатам.

Ключевые слова: термомеханические процессы, температурное поле, метод покомпонентного расщепления, сплайны, математическое моделирование, итерационные методы.

NUMERICAL MODELING OF STATE ELASTIC-PLASTIC CYLINDRICAL BODIES IF EXPOSED TO HIGH TEMPERATURE LOADS**Steblyanko P.O., Dyomichev K.E.**

The work is devoted to numerical modeling of the state of elastic-plastic cylindrical bodies under the influence of high-temperature loads. An iterative method of componentwise splitting is developed to solve systems of differential equations describing the processes of heat conduction and deformation in nonlinear composite cylindrical bodies for numerical modeling of their elastic-plastic behavior under the influence of temperature and force loading. In this case, the approximation apparatus of strained splines and cubic B splines is used, which makes it possible to take into account the complex dependencies of material properties on thermomechanical processes. The authors investigated the temperature field of a cylindrical body, which is in an upright position and at an angle, as well as all the necessary elements of stress and strain tensors. The above results have a higher order of accuracy in comparison with similar results obtained by the difference method. The results obtained make it possible to predict the durability and reliability of objects operating under shock non-stationary temperature loads. An effective numerical method is proposed for solving three-dimensional non-stationary problems of thermomechanics, based on reduction of the problem to a system of three successively solved two-dimensional problems, when unknown quantities are represented as two-dimensional polynomial and strained splines. The constructed iterative formulas for determining the temperature, displacement velocities, stress tensor components and deformation allow us to obtain the third order of the time approximation method and the third and fourth order in coordinates.

Keywords: thermomechanical processes, temperature field, method of componentwise splitting, splines, mathematical modeling, iterative methods.

УДК 662.995

Сухой К.М., Коломиец Е.В., Сухая И.В., Беляновская Е.А.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АДСОРБЦИОННОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ОТОПЛЕНИЯ

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр

Работа посвящена построению эффективного алгоритма решения задачи расчета эксплуатационных характеристик адсорбционного аккумулятора тепловой энергии для системы децентрализованного отопления. Предлагается следующий порядок расчета: вычисление коэффициента массопередачи, величины адсорбции, полезной теплоты адсорбции, определение затрат теплоты на процесс, которые включают затраты теплоты для нагрева адсорбента, корпуса установки, воды в баке, испарение воды в баке, нагревание адсорбированной воды и десорбцию, а также вычисление коэффициента полезного действия. Изучены эксплуатационные характеристики теплового аккумулятора закрытого типа при использовании композитного адсорбента «силикагель/сульфат натрия». Влияние скорости паровоздушного потока на коэффициент полезного действия учтено путем введения коэффициента, равного величине адсорбции. Установлено повышение коэффициента полезного действия при повышении скорости движения и относительной влажности паровоздушной смеси. Показано, что температура паровоздушной смеси практически не влияет на его величину. Пользуясь предложенным алгоритмом, выявлены оптимальные эксплуатационные характеристики адсорбционного теплового аккумулятора закрытого типа на основе композитного сорбента «силикагель – сульфат натрия» для системы отопления частного дома (скорость паровоздушной смеси 0,6–0,8 м/с и относительная влажность 40–60%), при которых коэффициент полезного действия достигает максимальных значений (около 55%).

Ключевые слова: адсорбционный аккумулятор тепловой энергии, коэффициент полезного действия, адсорбция, композитный адсорбент, коэффициент массопередачи.

Постановка проблемы

Монотонный рост стоимости первичного топлива и как следствие услуг централизованного отопления обуславливает более широкое применение нетрадиционных источников энергии и активный переход потребителей к системам децентрализованного теплоснабжения. Однако, эксплуатация нетрадиционных источников энергии существенно ограничена неравномерностью поступления в течение дня, изменчивостью метеорологических условий, несогласованностью периодов максимальной выработки тепла и его потребления. В этих условиях становится актуальной разработка эффективных аккумуляторов низкопотенциальной тепловой энергии, наиболее перспективными из которых являются сорбционные тепловые аккумуляторы.

Анализ последних исследований и публикаций

Адсорбционные материалы десятилетиями рассматривались, как перспективные для аккумуляции низкопотенциального тепла [1]. Основные принципы моделирования и оптимизации циклических адсорбционных процессов представлены в работах Лукина [2]. Тем не менее, оценка рабочих характеристик теплоаккумулирующих устройств и выбор их оптимальных конструкции и рабочих параметров предполагает проведение многофакторных экспериментов тепломассопереноса в данных средах, которые связаны с большими материальными затратами. Поэтому разработка алгоритма расчета эксплуатационных характеристик адсорбционных теплоаккумулирующих устройств приобретает первоочередное значение.

© Андреев П.Ю., Потапенко Е.В., І.П. Ісаєнко І.П., 2017

Формулирование цели исследования

Согласно [2] система дифференциальных уравнений, которые описывают внутреннюю диффузионную кинетику адсорбции при практически мгновенном установлении равновесия между концентрацией адсорбата в газе, который заполняет поры и его концентрацией в адсорбированном состоянии включает:

1. Уравнение материального баланса:

$$\frac{\partial a}{\partial t} + \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{\eta^K} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D \cdot \eta^K \frac{\partial c}{\partial \eta} \right).$$

2. Уравнение изотермы адсорбции:

$$a = f(c).$$

3. Начальные условия:

$$a(\eta, 0) = c(\eta, 0) = 0.$$

4. Граничные условия:

$$c(R, t) = c_0, \left[\eta^K \cdot \frac{\partial c}{\partial \eta} \right]_{\eta \rightarrow 0} = 0.$$

Здесь a и c – концентрация адсорбата в подвижной и неподвижной фазах; $\eta = x$ при параметре формы зерна $K = 0$ – для призматического или цилиндрического зерна длиной $2R$, боковые поверхности которого непроницаемы (пластина); $\eta = r$ – радиальная координата для цилиндрического зерна с непроницаемыми торцами ($K = 1$) или сферического зерна ($K = 2$); t – время; D – эффективный коэффициент диффузии. Насыщение происходит с внешней поверхности гранулы, где поддерживается постоянная концентрация $c = c_0$.

Примем, что в начальные моменты времени зерно не содержит адсорбата, а коэффициент диффузии $D = const$.

Необходимо выбрать эксплуатационные параметры, при которых коэффициент полезного действия теплового аккумулятора является максимальным. На рис. 1 приводится схема алгоритма расчета коэффициента полезного действия теплового аккумулятора.

На рис. 2 представлена конструкция адсорбционного теплового аккумулятора закрытого типа [3].

Процесс эксплуатации адсорбционного теплового аккумулятора реализуется в 4 этапа.

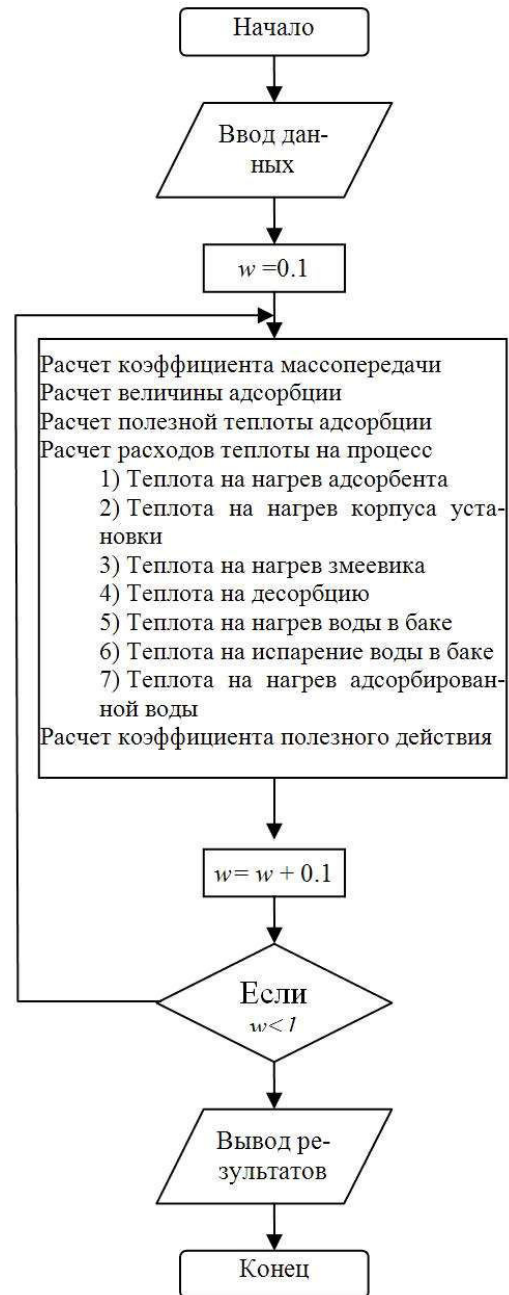


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета коэффициента полезного действия сорбционного теплового аккумулятора

На первом этапе происходит прогрев адсорбента (теплоаккумулирующего материала) от температуры окружающей среды до температуры начала адсорбции. На втором этапе происходит адсорбция водяного пара. На третьем – происходит нагрев композитного материала до температуры регенерации и его регенерация – десорбция воды. И на четвертом – происходит охлаждение композитного материала до температуры начала адсорбции.

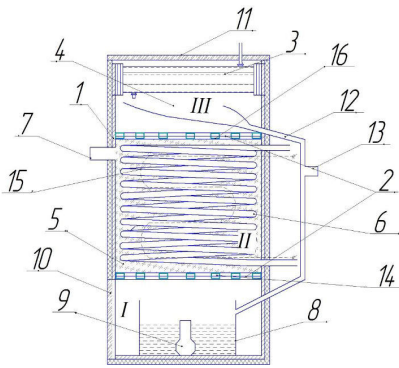


Рис. 2. Конструкция сорбционного теплового аккумулятора:
 1 – теплоизолированный корпус; 2 – сетчатые перегородки;
 3 – конденсатор; 4 – тарелка для сбора конденсата;
 5 – адсорбционно-десорбционный реактор; 6 – змеевик;
 7 – патрубок; 8 – бак с водой; 9 – испаритель;
 10, 11 – крышки; 12 – труба; 13 – патрубок;
 14 – стальные жалюзи; 15 – резистивный нагревательный элемент; 16 – стальные жалюзи

Учитывая эти стадии, коэффициент полезного действия (КПД) рассчитывали, как, %:

$$КПД = \frac{Q_n}{Q_3} \cdot 100, \tag{1}$$

где Q_n – полезная теплота адсорбции, кДж:

$$Q_n = M_{сорб} \cdot \Delta H_{сор}, \tag{2}$$

где $M_{сорб}$ – масса сорбента, кг; $\Delta H_{сор}$ – теплота сорбции, кДж/кг; Q_3 – затраты теплоты, кДж:

$$Q_3 = Q_{сорб} + Q_{кор} + Q_{зм} + Q_{нагр} + Q_{исп}^{воды} + Q_{дес} + Q_{сор}^{воды}, \tag{3}$$

где $Q_{комп}$, $Q_{кор}$, $Q_{зм}$, $Q_{дес}$, $Q_{нагр}$, $Q_{исп}^{воды}$, $Q_{сор}^{воды}$ – соответственно, на каждой из стадий, затраты теплоты для нагрева композита, корпуса установки, композита, воды в баке, испарение воды в баке, нагревание адсорбированной воды, кДж.

Количество теплоты, необходимое для нагревания материала и деталей устройства рассчитывали по общеизвестной формуле

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta t. \tag{4}$$

Воздействие скорости движения паровоз-

душной смеси на коэффициент полезного действия учтен введением в расчет коэффициента A , который показывает величину адсорбции, кг/кг. Этот коэффициент использовали при расчете расхода теплоты на десорбцию:

$$Q_{дес} = \Delta H_{дес} \cdot M_{ком} \cdot A \tag{5}$$

и на нагрев адсорбированной воды:

$$Q_{сор}^{воды} = M_{сорб} \cdot A \cdot C_v \cdot (t_{рег} - t_{н.с.}), \tag{6}$$

где $\Delta H_{дес} = 2850$ – теплота десорбции, кДж/кг.

$$A = \frac{C_0 - C}{M_{ком}} \cdot V_{возд} \tag{7}$$

где $V_{нов}$ – объем воздуха: $V_{нов} = F_{адс} \cdot w \cdot \tau$, м³; w – скорость паровоздушной смеси, м/с; $F_{адс}$ – площадь сечения теплового аккумулятора, м²; C – концентрация паровоздушной смеси на выходе из теплового аккумулятора [4]:

$$C = \frac{C_0}{\frac{[\beta \cdot (-\tau \cdot w \cdot C_0) + H]}{a} \cdot \frac{e}{w} + 1}, \tag{8}$$

где τ – продолжительность адсорбции, с; C_0 – концентрация паровоздушной смеси на входе в тепловой аккумулятор, кг/кг; H – высота теплового аккумулятора, м; a – сорбционная емкость материала, кг/кг; β – коэффициент массопередачи, определенный по зависимости [5]:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{1}{\beta_n} + \frac{1}{\beta_{пр}}, \tag{9}$$

где β_y , β_n и $\beta_{пр}$ – коэффициенты массоотдачи в газовой фазе, в порах и продольного перемешивания [5].

Изложение основного материала исследования

На рис. 3 и 4 представлены зависимости коэффициента полезного действия от скорости паровоздушного потока, рассчитанные по формулам (1)–(9).

В качестве теплоаккумулирующего материала использован композитный адсорбент «силикагель/Na₂SO₄», основные характеристики которого приведены в [6].

Повышение скорости движения и относительной влажности паровоздушной смеси сопровождается ростом коэффициента полезного дей-

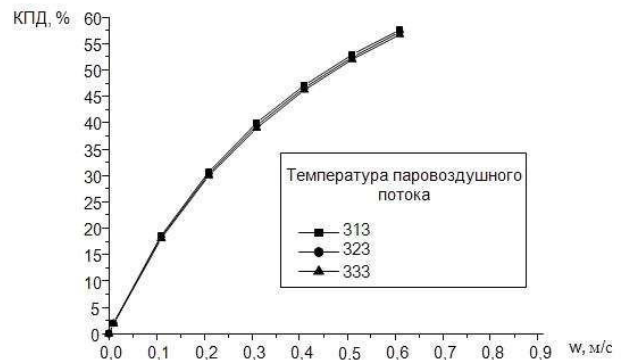
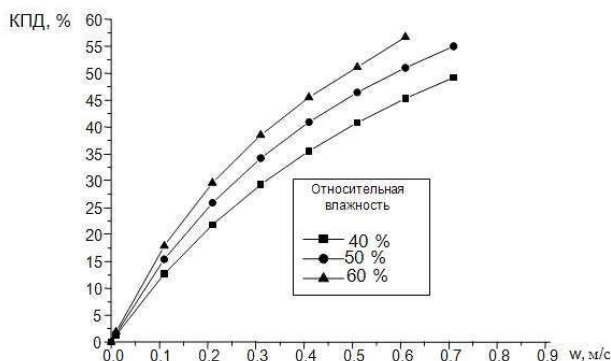
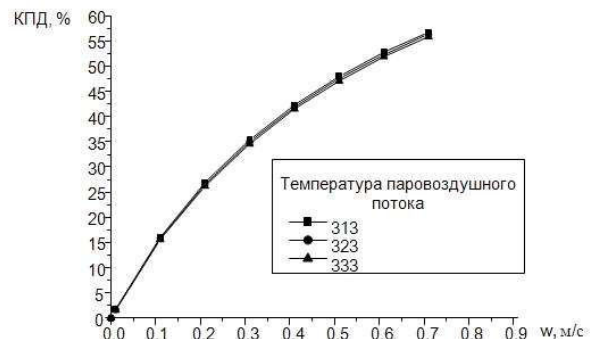
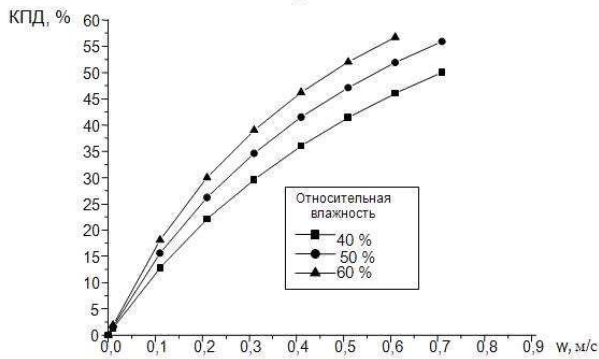
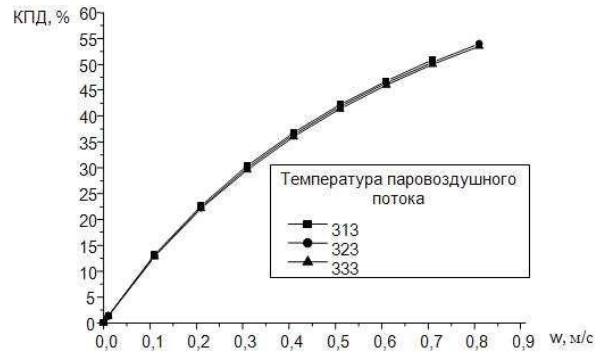
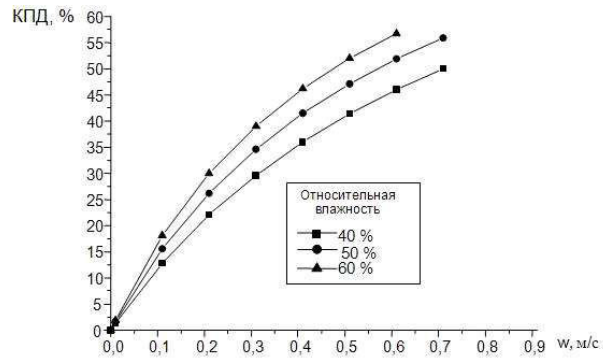


Рис. 3. Влияние скорости паровоздушного потока при относительной влажности 40–60%: а) температура регенерации 80°C; б) температура регенерации 90°C; в) температура регенерации 100°C

Рис. 4. Влияние температуры паровоздушной смеси (относительная влажность 40% (а), 50% (б) и 60% (в)) на коэффициент полезного действия теплового аккумулятора

ствия. Температура паровоздушной смеси практически не влияет на его величину. Максимальные значения КПД (около 55%) наблюдаются при относительной влажности 40–60% при скоростях паровоздушной смеси 0,6–0,8 м/с.

Выводы

Разработан алгоритм расчета коэффициента полезного действия адсорбционного теплового аккумулятора закрытого типа для систем децентрализованного отопления. Предложенный алгоритм расчета эксплуатационных характеристик

адсорбционного теплового аккумулятора позволяет установить оптимальные эксплуатационные характеристики адсорбционного теплового аккумулятора для системы отопления частного дома.

Работа выполнена при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований (номер государственной регистрации 0116U001489).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Comparison of the thermal performance of a solar heating system with open and closed solid sorption storage* / Bertsch F., Dagmar J., Asenbeck S. and others // *Energy Procedia*. – 2014. – Vol.48. – P.280-289.

2. Лукин В.Д., Новосельский А.В. Циклические адсорбционные процессы: Теория и расчет. – Л.: Химия, 1989. – 256 с.

3. Пат. 83436 А Україна, МПК F 24 H 7/00. Тепловий акумулятор // Сухий К.М., Сухий М.П., Беяновська О.А., Козлов Я.М., Коломієць О.В. (Україна); заявник та патентовласник ДВНЗ УДХТУ. – № u 2013 03474; Заявл. 21.03.13; Опубл. 10.09.2013. Бюл. № 17. – 5 с.

4. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Уч. пособие для вузов; под ред. чл.-кор. АН СССР П.Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

5. Математическое моделирование и управление процессом короткоциклового безнагревной адсорбции / В.Г. Матвейкин, В.А. Погонин, С.Б. Путин, С.А. Скворцов. – М.: Изд-во Машиностроение-1, 2007. – 140 с.

6. *Structure and Adsorption Properties of the Composites 'Silica Gel – Sodium Sulphate', obtained by Sol – Gel Method* / Kostyantyn M. Sukhyu, Elena A. Belyanovskaya, Yaroslav N. Kozlov, Elena V. Kolomyets, Mikhaylo P. Sukhyu. // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Vol.64. – № 1-2. – P.408-412.

Поступила в редакцію 31.10.2016
Рецензент: д.т.н., проф. Черваков О.В.

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АДСОРБЦІЙНОГО АКУМУЛЯТОРА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СИСТЕМИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ОПАЛЕННЯ

Сухий К.М., Коломієць О.В., Суха І.В., Беяновська О.А.

Робота присвячена побудові ефективного алгоритму розв'язання задачі розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного акумулятора теплової енергії для системи децентралізованого опалення. Пропонується наступний порядок розрахунку: обчислення коефіцієнта масопередачі, величини адсорбції, корисної теплоти адсорбції, визначення витрат теплоти на процес, які включають витрати теплоти для нагріву адсорбенту, корпусу установки, води в баку, випаровування води в баку, нагрівання адсорбованої води і десорбцію, а також обчислення коефіцієнта корисної дії. Вивчено експлуатаційні характеристики теплового акумулятора закритого типу при використанні композитного адсорбенту «силікагель/натрій сульфат». Вплив швидкості пароповітряного потоку на коефіцієнт корисної дії враховано шляхом введення коефіцієнта, рівного величині адсорбції. Встановлено підвищення коефіцієнта корисної дії при підвищенні швидкості руху і відносної вологості пароповітряної суміші. Показано, що температура пароповітряної суміші практично не впливає на його величину. Користуючись запропонованим алгоритмом, виявлені оптимальні експлуатаційні характеристики адсорбційного теплового акумулятора закритого типу на основі композитного сорбенту «силікагель – сульфат натрію» для системи опалення приватного будинку (швидкість пароповітряної суміші 0,6–0,8 м/с і відносна вологість 40–60%), при яких коефіцієнт корисної дії досягає максимальних значень (близько 55%).

Ключові слова: адсорбційний акумулятор теплової енергії, коефіцієнт корисної дії, адсорбція, композитний адсорбент, коефіцієнт масопередачі.

CALCULATION ALGORITHM OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF ADSORPTIVE HEAT STORAGE DEVICE FOR DECENTRALIZED SPACE HEATING SYSTEM

Sukhyu K.M., Kolomyets E.V., Sukha I.V., Belyanovskaya E.A.

The work is devoted to the development of an efficient algorithm for solving the problem of calculating the operating characteristics of an adsorption heat energy storage device for a decentralized space heating system. The following calculation procedure is proposed: calculation of the mass transfer coefficient, adsorption amount, useful heat of adsorption, determination of the heat input, it being calculated as heat inputs for heating the adsorbent, device housing, water in the tank, evaporation of water in the tank, heating of the adsorbed water and desorption. Then coefficient of efficiency is calculated. The operating characteristics of a closed-type heat energy storage were studied when the composite adsorbent «silica gel/sodium sulfate» used. The effect of the steam-air flow rate on the efficiency is taken into account by introducing a coefficient equal to the value of the adsorption. An increase in the efficiency coefficient was stated with an increase of the speed of movement and relative humidity of the vapor-air mixture. It is shown that the vapor-air flow temperature practically does not affect its value. Having been used the suggested algorithm, the optimal operating characteristics of an adsorption heat storage device of a closed type based on a composite sorbent «silica gel-sodium sulfate» for a private house heating system are revealed to be air-gas mixture velocities 0.6-0.8 m/s and relative humidity 40-60%. When these operational data applied, the efficiency coefficient is shown to reach the maximum values (about 55 %).

Keywords: heat energy storage device, coefficient of efficiency, adsorption, composite adsorbent, mass transfer coefficient.

Терновая Е.В., Прядко Н.С.

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ МАТЕРИАЛОВ НА АМПЛИТУДУ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ

**Институт технической механики Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины, г. Днепр**

Работа посвящена исследованию влияния размера частиц газодисперсных потоков на амплитуду акустических сигналов, как в процессе измельчения, так и в процессе транспортировки сыпучих материалов. Экспериментально подтверждена зависимость величины амплитуды сигналов, полученных при проведении акустического мониторинга процесса струйного измельчения различных сыпучих материалов (шлак, кварц, шамот), от гранулометрического состава материала. Проведены экспериментальные исследования на разработанных установках «Гранулометр-1» и «Гранулометр-2» для транспортирования материалов в потоке энергоносителя. Установлена аналогичная зависимость для транспортировки сыпучих материалов в потоке энергоносителя, как и при измельчении материалов. Получены уравнения корреляционной связи максимальных значений амплитуд полученных акустических сигналов с размером частиц исследуемого материала (кварц, шамот), которые могут служить основой контроля качества материала при струйном измельчении материалов.

Ключевые слова: гранулометрический состав, акустические сигналы, амплитуда.

Постановка проблемы

Порошкообразные материалы применяются во многих отраслях промышленности: фармацевтике, строительстве, металлургии и т.д. Как известно, свойства порошков в значительной степени зависят от их дисперсности. В технологических процессах, которые связаны с изготовлением и переработкой порошкообразных материалов, анализ гранулометрического состава является обязательным методом контроля.

Гранулометрический состав так же является критерием, с помощью которого можно определить качество промежуточной и готовой продукции в порошковой технологии, поэтому контроль качества фракционного состава материала является актуальным вопросом при решении проблемы прогнозирования гранулометрического состава продуктов измельчения.

Анализ последних исследований и публикаций

Одной из первых работ, в которой приводятся рекомендации по исследованию связей грансостава материала с величиной максимальной амплитуды сигналов в процессе измельчения, описаны в статьях [1–2]. Также в работах [3–4] представлены рекомендации по исследо-

ванию связей размеров частиц материала с параметрами акустических сигналов, как в процессе измельчения, так и транспортировки материала.

Формулирование цели исследования

Исследование связей гранулометрического состава материала с величиной амплитуды сигналов в процессе измельчения и транспортировки материала в потоке энергоносителя.

Изложение основного материала исследования

Экспериментальные исследования проводились на струйной измельчительной установке УСИ-20, установках «Гранулометр-1» и «Гранулометр-2», включающие в себя эжекторный узел струйной мельницы УСИ-20. Давление сжатого воздуха во всех экспериментальных исследованиях составляло $P=0,3$ МПа и частота вращения ротора классификатора струйной установки при измельчении составляла $n=2000$ мин⁻¹. Рассматривались материалы различной плотности, такие как шлак, кварц и шамот, крупностью от 0,0063 до 1,6 мм.

На рис. 1 представлены гранулометрические характеристики исследуемых материалов.

Первый этап исследовательских испытаний проводился на лабораторной мельнице УСИ-20, которая представлена на рис. 2.

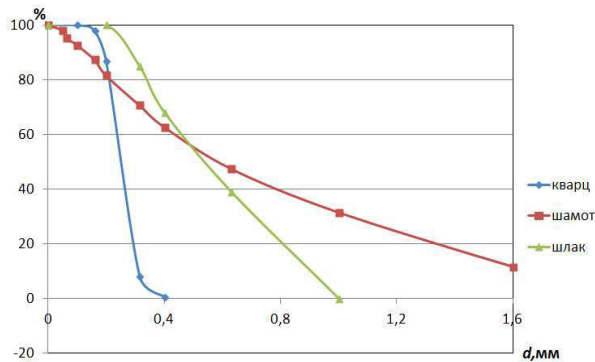


Рис. 1. Суммарные характеристики крупности исходных материалов

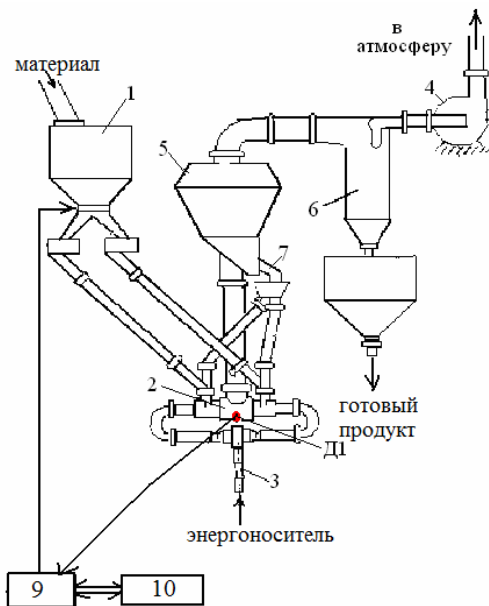


Рис. 2. Схема струйной измельчительной установки УСИ-20: 1 – загрузочный бункер; 2 – помольная камера; 3 – энергоноситель (воздух); 4 – вентилятор; 5 – классификатор; 6 – циклон; 7 – материал, поступающий на доизмельчение; 8 – пьезокерамический датчик; 9 – аналогово-цифровой преобразователь; 10 – персональный компьютер

На рис. 3 приведены связи размеров частиц материалов с акустическими сигналами, записанными в ходе мониторинга процесса измельчения.

Получены так же уравнения зависимостей

величины максимальной амплитуды от размера частиц измельчаемого материала и коэффициент корреляции для шлака и кварца соответственно:

$$y = 99,45x^2 + 41,798x - 1,4531, R = 0,993;$$

$$y = 131,07x^2 + 33,125x + 4,7731, R = 0,994.$$

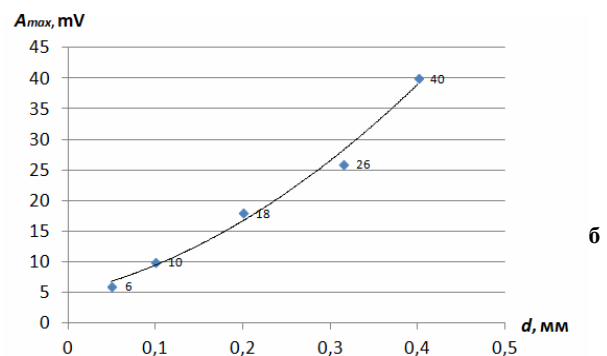
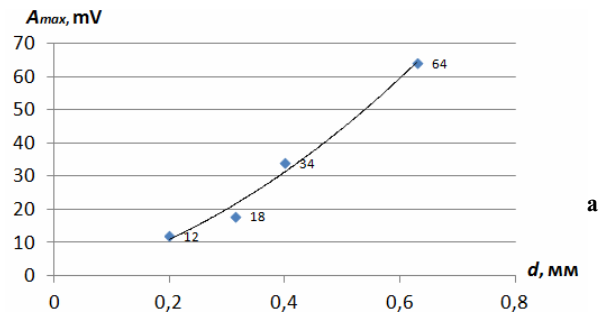


Рис. 3. Зависимость величины максимальной амплитуды от размеров частиц материала: а) шлака; б) кварца при измельчении

Высокие коэффициенты корреляция подтверждают установленную ранее [1–2] связь величины максимальной амплитуды сигналов A_{max} и крупности материала в ходе измельчения в струйной противоточной мельнице.

Второй этап исследовательских испытаний проводился на разработанной установке «Гранулометр-1», которая включает в себя эжекторный узел струйной мельницы УСИ-20. Схема установки представлена на рис. 4.

Связь амплитуды A_{max} с крупностью транспортируемого материала установлена в условиях работы установки «Гранулометр-1» на различных материалах: шамот, шлак, кварц крупностью – менее 1,6 мм. На рис. 5 показаны зависимости изменения амплитуды сигналов A_{max} и размера частиц при транспортировке материалов в потоке.

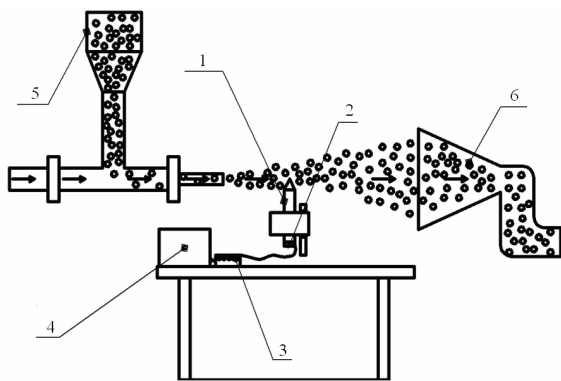


Рис. 4. Схема установки «Гранулометр-1»: 1 – волновод; 2 – пьезокерамический датчик; 3 – аналогово-цифровой преобразователь; 4 – персональный компьютер; 5 – загрузочный бункер; 6 – бункер-улавливатель

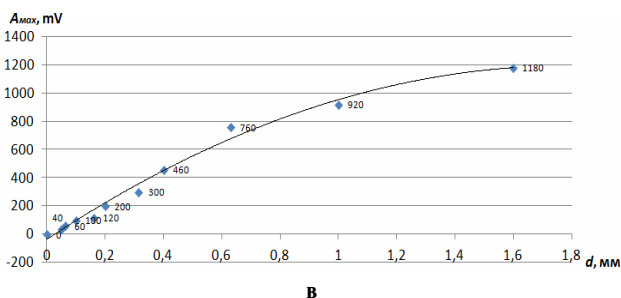
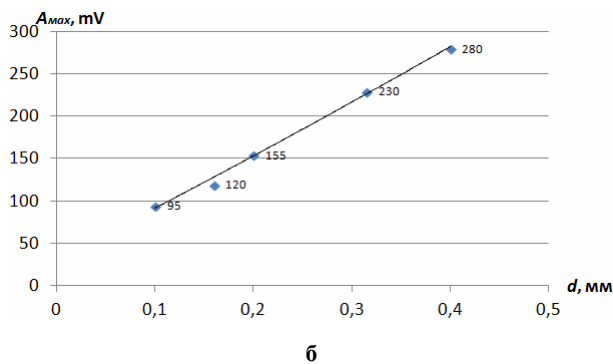
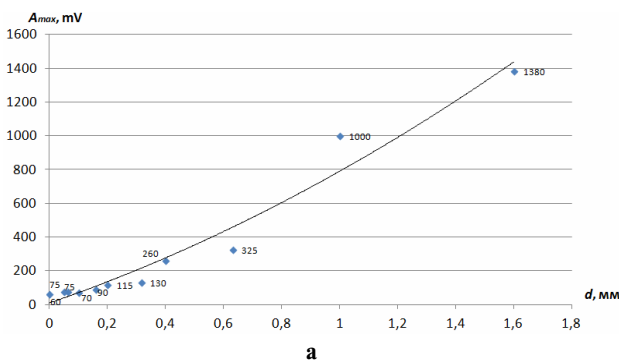


Рис. 5. Зависимость величины максимальной амплитуды от размеров частиц шлака (а), кварца (б) и шамота (в) при пневмотранспортировке

Установлены уравнения зависимостей величины максимальной амплитуды от размера частиц транспортируемого материала и соответствующие коэффициенты корреляции для каждого из рассмотренных материалов:

шлак:

$$y = 186,89x^2 + 593,92x + 8,4896, R = 0,98;$$

кварц:

$$y = 96,732x^2 + 587,4x + 31,484, R = 0,998;$$

шамот:

$$y = -372,45x^2 + 1353,4x - 32,173, R = 0,994.$$

Анализ показывает, что увеличение крупности частиц различных материалов (рис. 4: а – шлак, б – кварц, в – шамот) сопровождается ростом максимальной амплитуды сигналов. Это говорит о том, что размер частиц коррелирует с амплитудой сигналов и при транспортировании материалов в потоке воздуха.

Третий этап исследовательских испытаний проводился на разработанной установке «Гранулометр-2», которая включает в себя помимо эжекторного узла струйной мельницы УСИ-20, износостойкую пластину, которая способствует разделению частиц с учетом влияния сил тяжести (рис. 6).

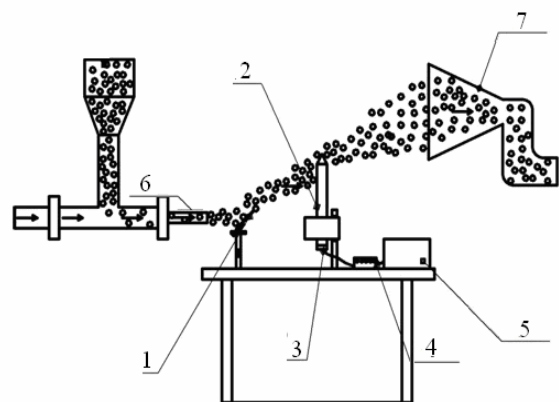


Рис. 6. Схема установки «Гранулометр-2»:

1 – пластина; 2 – волновод; 3 – пьезокерамический датчик; 4 – АЦП; 5 – компьютер; 6 – разгонная трубка; 7 – бункер-улавливатель

На рис. 7 показаны зависимости изменения амплитуды сигналов A_{max} и размера частиц при транспортировке материалов в потоке с ус-

тановленной пластиной.

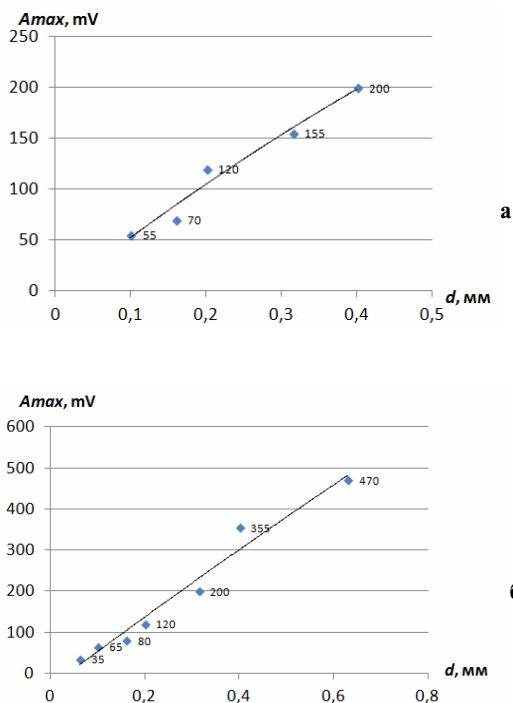


Рис. 7. Зависимость величины максимальной амплитуды от размеров частиц а) кварца и б) шамота при пневмотранспортировке

Установленные зависимости величины максимальной амплитуды от размера частиц транспортируемого материала подтверждают выявленную ранее зависимость этих параметров, на что указывают высокие коэффициенты корреляции, в частности для кварца и шамота:

$$y = -192,77x^2 + 583,38x - 4,1843, R = 0,983;$$

$$y = -74,616x^2 + 864,79x - 33,646, R = 0,984.$$

Выводы

Подтверждена зависимость величины амплитуды сигналов акустического мониторинга процесса измельчения от гранулометрического состава материала.

Установлена аналогичная зависимость для транспортировки сыпучих материалов в потоке энергоносителя.

Получены уравнения корреляционной связи максимальных значений амплитуд полученных акустических сигналов с размером частиц исследуемого материала, которые могут служить основой контроля качества материала при струйном измельчении материалов.

В дальнейшем необходимо разработать ме-

тодику контроля гранулометрического состава материала для улучшения качества продуктов измельчения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прядко Н.С. Анализ качества продукта струйного измельчения на основе акустического мониторинга // Техническая механика. – 2010. – № 2. – С.81-86.
2. Возможности акустического прогнозирования гранулометрии частиц при струйном измельчении / Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Левченко К.А. и др. // Вестник НТУ «ХПИ». – 2014. – Вып. № 52 – С.10-18.
3. Терновая Е.В. Анализ частот сигналов при транспортировании и измельчении сыпучих материалов в потоке // Збагачення корисних копалин. – 2016. – № 63(104). – С.59-65.
4. Прядко Н.С., Терновая Е.В. Экспериментальные исследования характеристик акустических сигналов при транспортировании материалов в установках «Гранулометр» // Збагачення корисних копалин. – 2016. – № 64(105). – С.111-118.

Поступила в редакцию 12.10.2016

Рецензент: д.т.н., проф. Стрельников Г.А.

ВПЛИВ ДИСПЕРСНОСТІ МАТЕРІАЛІВ НА АМПЛІТУДУ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ РОБОЧОЇ ЗОНИ

Тернова К.В., Прядко Н.С.

Робота присвячена дослідженню впливу розміру часток газодисперсних потоків на амплітуду акустичних сигналів, як в процесі подрібнення, так і в процесі транспортування сипких матеріалів. Експериментально підтверджена залежність величини амплітуди сигналів, отриманих при проведенні акустичного моніторингу процесу струминного подрібнення різних сипких матеріалів (шлак, кварц, шамот), від гранулометричного складу матеріалу. Проведено експериментальні дослідження на розроблених установках «Гранулометр-1» і «Гранулометр-2» для транспортування матеріалів в потоці енергоносія. Встановлено аналогічну залежність для транспортування сипких матеріалів в потоці енергоносія, як і при подрібненні матеріалів. Отримано рівняння кореляційного зв'язку максимальних значень амплітуд отриманих акустичних сигналів з розміром частинок досліджуваного матеріалу (кварц, шамот), які можуть слугувати основою контролю якості матеріалу при струминному подрібненні матеріалів.

Ключові слова: гранулометричний склад, акустичні сигнали, амплітуда.

**INFLUENCE OF THE MATERIALS DISPERSITY ON
AMPLITUDE OF ACOUSTIC SIGNALS OF THE
WORKING ZONE**

Ternovaya E.V., Pryadko N.S.

The work is dedicated to the research of particle size influence of gas-dispersible flows on amplitude of acoustic signals, both in the grinding process and in the bulk material transportation. The dependence of value amplitude of signals received when carrying out acoustic monitoring of process of jet grinding of different bulks (slag, quartz, chamotte) from particle size distribution of material is confirmed experimentally. Experimental studies have been carried out on the developed Granulometer-1 and Granulometer-2 devices for the transportation of materials in the energy carrier flow. A similar dependence has been established for the transport of bulk materials in the energy carrier flow, as well as for the grinding of materials. The equations of correlative communication of the maximum values of the amplitudes of the received acoustic signals with the particle size of the researched material (quartz, chamotte) which can form a basis of quality control of material in case of jet grinding of materials are received.

Keywords: particle size distribution, acoustic signals, amplitude.

*Us S.A.^a, Stanina O.D.^b***LOCATION-ALLOCATION PROBLEMS**^a **National Mining University, Dnipro**^b **Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro**

The paper considers various location-allocation problems arising in the process of strategic planning of regional development. Thus, the problems are attractive for both commercial and state-owned companies. Process of such problems formation and development has been analyzed. Their classification depending upon demand, the number of product types, objects to be located, and type of range where their location takes place has been shown. General statement has been formulated; basic mathematical models of location-allocation problems have been demonstrated. Both methods and approaches for such problems solving have been described. Particular attention has been paid to infinite-dimensional location-allocation problems, i.e. to continuous problems of optimum set separation. In the context of the problems, the range in which objects are located, is a certain set continuously filled with consumers (or manufacturers) of specific product. Connection of optimum set separation problems with multistage location-allocation problems is considered separately in terms of two-stage problem. Mathematical model of multistage location problem being a combination of discrete location problem (as one of the stages) and a problem of optimum set separation is demonstrated. Their features and difficulties arising in the process of combined types of problem solution have been emphasized. Relevant research policy has been determined.

Keywords: location-allocation problems, optimization, problems of optimum partition of sets, multistage problems, mathematical models.

The problem setting

A great number of research efforts concern the problems of object planning and locating. Such problems are typical for practical studies as area for their location may be of various nature, structure, and characteristics and the “object” may be interpreted rather differently. Problems concerning location of different service centers (hospitals, shops, fire stations, various enterprises etc.); formation of general enterprise plans; irrigative problems; design of mobile networks are the examples of such problems. Solution of the problems involves different techniques and models depending upon available output data and conditions which in turn involve systematization of studies in progress. That is why both research and analysis of mathematical models for such problems is relevant problem.

Analysis of latter research and publications

For the first time, the problems were formulated as early as in 17th century. Their emergence and first attempts to solve them are connected with the name of Pierre Fermat who has formulated probably

the first location problem currently known as Fermat point: determine the fourth point for the preset three ones in such a way that if three segments are passed into the points then sum of the three segments will be of the least value. The problem was solved partially by E. Torricelli and B. Cavalieri in 1640. As for back as in 1970 T. Simpson modified it and generalized in the context of account of arbitrary weighs and connections between objects.

From the viewpoint of object location the problem was further evolved in 1909 owing to efforts by M. Weber who used the model to determine optimum location for factories in terms of definite locations of resources and consumers. Currently the problem is known as the Weber problem being a part of general problem of geographical location of human business activities. Moreover, Weber believes that economic benefit depending upon location of factories is that very location factor (i.e. “standard factor”). In turn, he considered benefit as cuts in expenditures connected with output of products and their sales. In practice that meant the possibility to

manufacture the product locally with less expenditures to compare with other places.

Currently a number of models of location problem, various optimum criteria and types of source areas as well as type of source range are available [1].

Formulation of the research objectives

Objective of the research is to analyze available models to solve location problems and identify relevant policies for their analysis.

Statement of the research basic material

It is possible to divide all location problems into the two large categories (Figure): problems of location of interrelated objects and problems of location-allocation (problems connected with location of enterprises). Category one includes problems with foregone structure of relations between objects: Weber problems, quadratic allocation problem etc. Category two does not include relations between allocated objects – “suppliers”; allocation of specific objects – “clients” between them. Such problems involve: problems on p-median and p-centres; the simplest location problem etc. Further classification of the problems is possible using various parameters (Figure), e.g. in terms of demand – with uniform or non-uniform product demand. So-called problems of optimum set separation which classification is described in [9] is one of categories of location problems with continuous range. There are also classifications relying upon the availability of restrictions for production facilities, number of enterprise types, number of sources etc. [1,2]. As for the initial information, one may talk about determined and stochastic problems, location

problems under the conditions of either complete or incomplete information (location problems under fuzzy conditions) [8,9].

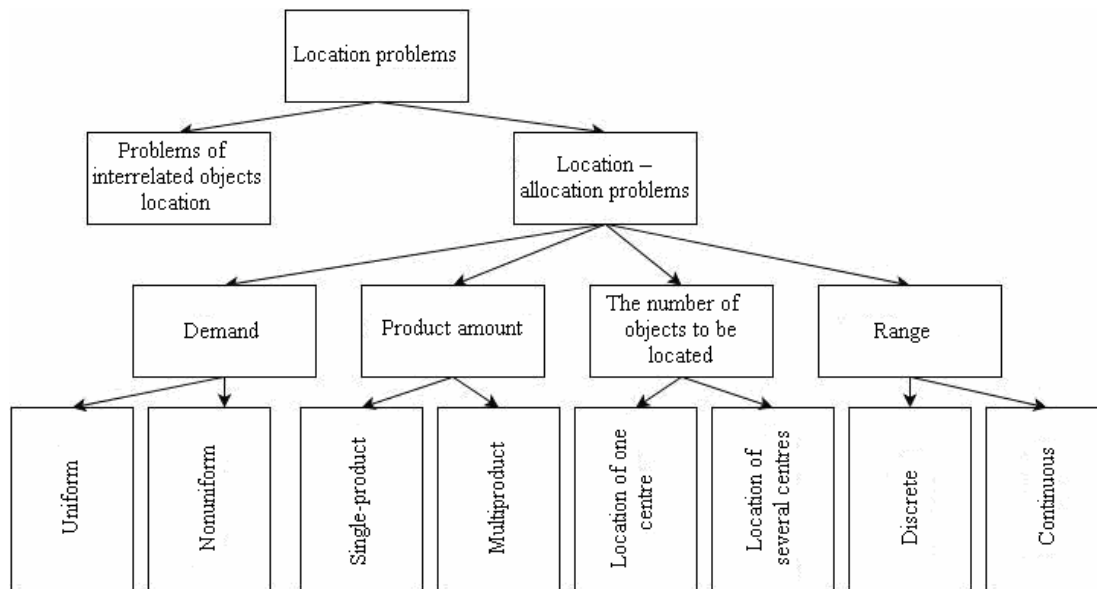
Give examples of several theoretical and practical problems which in the context of mathematical setting resolve into following location problems:

- scheduling;
- standardization;
- minimization of polynomials in boolean variables;
- two-level problems concerning the assortment of production selection;
- problems concerning the development of optimum set of rows of matrix pair, optimum rows of a product and associated parts;
- multistage problems of location etc.

It should be noted that great share of the activities is based the simplest location problem plus certain conditions: for instance, placing restrictions on production volume, product types, production stages, dynamics etc.

In the context of general statement, location-allocation problem (LAP) is interpreted as follows: it is required to determine the number of new objects as well as their location coordinates; it is required to allocate transport operations between new objects and available ones. The process involves the idea that the new objects will be located in such a way to minimize transportation costs while delivering goods from objects to “consumers”.

Formally, LAP is: it is required to locate N new manufacturers $(x_1, \dots, x_n) \in R^2$ taking into consideration of available M consumers



Types of location problems

$A = \{a_1, \dots, a_m\} \in R^2$ to minimize a sum of positively weighed distances between them.

Following types of LAPs are differentiated:

- single- and multiproduct;
- with location of one or more centres (enterprises);
- single- and multisource.

Thus, mathematical statement of the simplest LAP with single source (i.e. where consumer belongs to one manufacturer) and without restriction is formulated as follows:

Problem 1. Find:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M y_{ij} w_{ij} d(x_i, a_j)$$

if restrictions are:

$$\sum_{i=1}^N y_{ij} = 1, j = 1, \dots, M,$$

$$y_{ij} \in \{1, 0\}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M.$$

In this context Boolean variables $y_{ij}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M$ involve the information that available consumer belongs to a new manufacturer; that is

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } a_j \text{ belongs to } x_i, \\ 0 & \text{in any other case.} \end{cases}$$

The restriction implements a condition of the only source availability. Positive weighs $w_j, j = 1, \dots, M$ may mean demand of consumers a_j . In terms of specific centres the problem may be reduced to a problem of discrete set separation.

For the first time, LAP with a set of sources and without restrictions was formulated by Cooper in 1964 [2]. It looked like this:

Problem 1.1. Find

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M w_{ij} d(x_i, a_j)$$

if restrictions are:

$$\sum_{i=1}^N w_{ij} = r_j, j = 1, \dots, M,$$

$$w_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M,$$

$$x_i \in R^2, i = 1, \dots, N,$$

where w_{ij} is the quantity of goods delivered from a manufacturer with i number to a consumer with j number; $d(x_i, a_j)$ is distance from manufacturer i to consumer j .

The restriction makes it possible to deliver product from r_j plants to each buyer.

Subsequently, the problems were losing their simplicity due to placing restrictions on production facilities.

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij} w_{ij} d(x_i, a_j)$$

if restrictions are:

$$\sum_{j=1}^M w_{ij} = s_i, i = 1, \dots, N,$$

$$\sum_{i=1}^N w_{ij} = r_j, j = 1, \dots, M,$$

$$w_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M,$$

$$x_i \in R^2, i = 1, \dots, N,$$

where c_{ij} is transportation cost of a product unit per distance unit from manufacturer i to consumer j .

The restriction makes it possible to deliver product by r_j plants to each buyer as well as to restrict production facilities of s_i plants.

A number of techniques and algorithms to solve such problems are available today; among them are: branch-and-bound algorithm [3], Lagrange multipliers [4], taboo search, p-median method [5], genetic algorithm [6] and many others. However, the methods are partially continuous as there is such an assumption that the set of consumers is discrete; as a result, difficulties with consideration of demand arise. To solve the problems, the majority of current algorithms use the principle of demand aggregation. The principle involves simplification of input data set. Rather often the simplification is a result of use of arithmetic mean, mode, or median. From time to time application of the approach factors into significant errors which analysis is represented in paper [7].

It should be noted that lately more and more researchers have paid their attention to LAPs under the conditions of fuzziness. The problems differ in the consideration of the fact that in the majority of cases it is rather difficult (and sometimes impossible)

to obtain truthful information concerning environmental conditions. That is why models of such problems include stochastic and fuzzy components. Generally, consumer demand is used as unidentified factor.

Currently a great number of papers involve continuity of demand. Conditionally, the problems may be divided into problems with uniform demand allocation and nonuniform one. However, as practice demonstrates, if LAPs are solved in terms of standard statements, difficulties arise when restrictions are taken into consideration.

Progress of optimum set separation (OSS) [8, 9] helped determine a method to solve infinite-dimensional location problems.

OSS problems can be conditionally divided into the two categories: discrete problems and continual problems. Discrete problems (belonging to category one) are characterized by the fact that certain finite set is subject to separation. Continual problems (belonging to category two) are characterized by availability of continual set being subject to separation. Such type of problems is relatively new and implementation is more laborious. Nevertheless, the necessity to develop algorithms for solving continual problems is indisputable as the great number of practical problems may be described with the help of such models.

Continual linear problem concerning set separation is formulated as follows [8]: let Ω be closed, restricted, observable according to Lebesgue set of Euclidean space E_n . It should be separated into N subsets $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N$ observed according to Lebesgue; centres of the subsets? $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$ should be located within range to minimize a functional:

$$F(\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N) = \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} c_i(x, \tau_i) \rho(x) dx$$

if restrictions are:

$$\int_{\Omega_i} \rho(x) dx \leq b_i, i = \overline{1, N},$$

$$mes(\Omega_i \cap \Omega_j) = 0, i \neq j, i, j = \overline{1, N},$$

$$\sum_{i=1}^N \Omega_i = \Omega.$$

Functions $c_i(x, \tau_i), i = \overline{1, N}$ are real-valued, restricted, observable according to argument x by

Ω , and convex according to argument τ_i for all $i = \overline{1, N}$; $\rho(x)$ is real-valued, integrated function determined by ; are predetermined real-valued numbers satisfying the conditions of the problem solving.

Today problems of multistage production process location are claiming more and more attention to minimize total expenditures connected with delivery of product and primary material and to cover certain service area. They are another category of location-allocation problems being generalization of multistage transportation and production problems being studied actively. The problems mean that there are several groups of objects to be located. Each group has its own set of possible locations, and there is certain order of relations between them.

Two-stage problem can be used to illustrate a well-known formulation of multistage transportation and production problems [10]. Two-stage transportation and production problem is that one illustration manufacturing processes concerning one type of product, its delivery to the plants processing it into another type of product, its manufacturing and delivery to the end consumers. The simplest statements of such a problem consider two products – “raw material” and “end product”. However, the greater number of names (“raw material”, “semiproduct”, “end product”) are possible. In such a case we will talk on multistage problems. Under certain conditions, the formally multiproduct problems may be reduced to single-product problems of a staggered type, i.e. the problems in which all the non-zero coefficients of each row of output matrix of a simplex table have one and the same sign.

Contextual statement of a multistage transportation and production problem can be formulated as follows.

Assume that $N = \{1, \dots, n\}$ is a set of end product demand points, $M_r \subset N$ is a set of possible location points of r^{th} stage, $1 \leq r \leq p$; g_i^r is expenses for location of the enterprise of r^{th} stage within point r , $g_i^r \geq 0$; c_{ij} is expenses for transportation of a product unit from point r to point j , $c_{ij} \geq 0, i, j \in N$; b_j is the demand volume in point j , $b_j > 0, j \in N$.

It is meant that each point of end product demand as well as each point of any manufacturing level is supplied with the product by one manufacturer only; in this context, enterprise of r^{th} level is supplied with the product by the enterprise of $(r + 1)^{\text{th}}$ level, $1 \leq r \leq p - 1$.

It is required to select subsets of location point at every level (stage) $I^r \subset M_r, r = 1, \dots, p$ and implement allocation of the selected enterprises

within demand points in such a way to minimize total expenditures connected with location of all the selected enterprises and product transportation.

Demonstrate mathematical statement of such allocation problem (AP) when two stages are available, and Boolean variables of selection and allocation are used respectively [10]:

Assume that $x_i = 1 (y_k = 1)$ if the enterprise of 1st (2nd) level is located within $i \in M_1 (k \in M_2)$ point and $x_i = 0 (y_k = 0)$ in any other case; $x_{kij} = 1$ if j^{th} demand point is served by k^{th} point of 2nd level through i^{th} point of 1st level and $x_{kij} = 0$ in any other case.

Formal statement of the simplest multistage problem is as follows:

$$\sum_{i \in M_1} g_i^1 x_i + \sum_{k \in M_2} g_k^2 y_k + \sum_{j \in N} b_j \sum_{k \in M_2} \sum_{i \in M_1} (c_{ki} + c_{ij}) x_{kij} \rightarrow \min,$$

$$\sum_{k \in M_2} \sum_{i \in M_1} x_{kij} = 1, j \in N,$$

$$\sum_{k \in M_2} x_{kij} \leq x_i, j \in N, i \in M_1,$$

$$\sum_{i \in M_1} x_{kij} \leq y_k, j \in N, k \in M_2,$$

$$x_i, y_k, x_{kij} \in \{0,1\}.$$

Minimization of all total expenditures for manufacturing process and transportation of raw material as well as end product is a target function.

Numerical algorithms and methods to solve such problems considering greater dimension and complexity have been developed lately. Numerous papers including recent publications represent the obtained results. In this context orientation toward the use of heuristic algorithms is observed as they do not involve complicated theoretical demonstrations. However, infinite-dimensional multistage problems did not experience any analysis due to their more complicated implementation. It should be noted that there is a great variety of ranges where similar category of problems takes place. In terms of such problems, a set is continuous by its nature and available discrete models involve simplifications which can effect end result considerably. That can be demonstrated with the help of problems where manufacturers of one (or several) stages may be located within any range

point rather than being concentrated within certain points [11].

Introduce following symbols to develop mathematical model: Ω is the range within which enterprises are located; N is the required quantity of enterprises of stage 1, M is the required quantity of enterprises of stage 2; b_i is the capacity of i^{th} enterprise of stage 1; b_j is the capacity of j^{th} enterprise of stage 2; J is the set of possible location points of enterprises of stage 2, $J = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{M_1}\}$, $c_i^I(x, \tau_i)$ is delivery cost for raw material unit from point $x \in \Omega$ to i^{th} enterprise of stage 1; $c_{ij}^{II} = c(\tau_i, \tau_j)$ is the cost of raw material unit delivery from i^{th} enterprise of stage 1 to j^{th} enterprise of stage 2; K is a set of consumers; $c_{jk}^{III} = c(\tau_j, \tau_k)$ is the cost of delivery from j^{th} enterprise of stage 2 to k^{th} consumer; b_k is the demand of k^{th} consumer; $\rho(x)$ is the amount of resource within x point of Ω range; A_i^r is expenditures for i^{th} enterprise r^{th} stage; $\tau_i^r = (\tau_{i1}^r, \tau_{i2}^r)$ are coordinates of i^{th} enterprise r^{th} stage; $\tau_k = (\tau_1, \tau_2)$ are predetermined coordinates of consumer i , v_{ij}^{II} is the volume of product supplied from i^{th} enterprise of stage 1 to j^{th} enterprise of stage 2; v_{jk}^{III} is the volume of product supplied from j^{th} enterprise of stage 2 to k^{th} consumer.

Suppose:

$$\lambda_j = \begin{cases} 1 & \text{if enterprise of stage 2 is located in point } j \\ 0 & \text{in any other case} \end{cases}$$

Then mathematical model may be expressed in the form of: minimize

$$\sum_{i=1}^N A_i + \sum_{j=1}^M A_j \lambda_j + \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} c_i^I(x, \tau_i) \rho(x) dx + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij}^{II} v_{ij}^{II} \lambda_j + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K c_{jk}^{III} v_{jk}^{III} \lambda_j$$

if restrictions are:

$$\int_{\Omega_i} \rho(x) dx \leq b_i^I, i = \overline{1, N},$$

$$\sum_{j=1}^M v_{ij}^{II} \lambda_j \leq b_i^I, i = \overline{1, N},$$

$$\sum_{j=1}^M v_{ij}^{II} \lambda_j \leq b_i^I \lambda_j, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M},$$

$$\sum_{j=1}^M v_{ij}^{II} \lambda_j \geq b_k^I, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, K},$$

$$\bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega, \Omega_i \cap \Omega_j = 0, i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, N,$$

$$v_{ij}^{II} \geq 0, v_{jk}^{III} \geq 0, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}, k = \overline{1, K},$$

$$\lambda_j \in \{0, 1\}, \tau^I = (\tau_1^I, \tau_2^I, \dots, \tau_N^I), \tau^I \in \Omega^N.$$

Complexity of such problems is that mathematical model involves both discrete part and continuous one which suppose relevant combined methods of solution.

Conclusions

Nowadays studies concerning infinite-dimensional multistage location problems are almost not available due to their complexity. However, there is the whole raw of ranges where similar problems take place. In such problems outgoing set is continuous by its nature and the available discrete models need great number of simplifications effecting the end result. Thus, the development of models of infinite-dimensional multistage location problems as well as their solution methods is a rather topical task.

REFERENCES

1. Drezner Z., Hamacher H.W. Facility location: application and theory. – Berlin: Springer, 2004. – 457 p.
2. Döcher, Martin Bischoff and Kerstin. Allocation search methods for a generalized class of location-allocation problems // European Journal of Operational Research, 2009. – Vol.192. – I. 3. – P.793-807.
3. Van Roy T., Erlenkotter D. A dual-based procedure for dynamic facility // Management Sci., 1982. – Vol.28 (10). – P.1091-1105.
4. Lebedev, S.S., Kovalevskaia, M.I. Lagrange multipliers in the simplest location problem // Research in the field of discrete optimization, 1976. – P.170-180.
5. Alekseieva, Ye.V., Kochetov Yu. A. Genetic local search for the problem on p-median with preferences of clients // Discrete analysis and research of operations. – 2007. – Vol.14. – P.3-31.
6. Houck Ch.R., Jeffrey A. Joines, Michael G. Kay. Comparison of Genetic Algorithms, Random Restart and Two-

Opt Switching for Solving Large Location-Allocation Problems // Computers & Operations Research, 1996. – Vol.22 (6). – C.587-596.

7. Hagen-Zanker A., Jin Y. Reducing aggregation error in spatial interaction models by location sampling // The 11th International Conference on GeoComputation, 2011. – P.65-68.

8. Kiseliova, E.M., Shor N.Z. Continuous problems of optimum set separation: theory, algorithms, applications: Monograph. – K.: Naukova dumka, 2005. – 564 p.

9. Kiseliova E.M., Koriashkina L.S., Us S.A. Theory of optimum set separation in the problems of image identification, analysis, and identification of systems // Ministry of education and science of Ukraine; National Mining University. – D.: NМУ, 2015. – 270 p.

10. Gimadi E.Kh. Effective algorithm to solve multistage location problems within a chain // Discrete analysis and research of operations. IM SO RAS, Novosibirsk. – 1995. – Vol.2. – P.13-31.

11. Us S.A., Stanina O.D. On some mathematical models of facility location problems of mining and concentration industry // Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining. – Balkema, 2015. – P.419-424.

Received 12.10.2016

ЗАДАЧІ РОЗМІЩЕННЯ-РОЗПОДІЛУ

Ус. С.А., Станіна О.Д.

У статті розглянуто задачі розміщення-розподілу, які виникають при стратегічному плануванні розвитку регіону і тому представляють інтерес для комерційних та державних компаній. Проаналізовано процес формування та розвиток таких задач. Представлено їх класифікацію в залежності від: попиту, кількості видів продукції, об'єктів, що розміщуються, та виду області, в якій здійснюється розміщення. Сформульовано загальну постановку і приведені основні математичні моделі задач розміщення-розподілу. Описано методи та підходи до розв'язування таких задач. Особливу увагу приділено нескінченновимірним задачам розміщення-розподілу, а саме неперервним задачам оптимального розбиття множин. В цих задачах область, в якій проводиться розміщення об'єктів являє собою деяку множину, неперервно заповнену споживачами (або виробниками) певного виду продукції. Окремо розглянуто зв'язок задач оптимального розбиття множин із багатоступінними задачами розміщення-розподілу, на прикладі двоетапної задачі. Представлено математичну модель багатоступінної задачі розміщення, яка є комбінацією дискретної задачі розміщення (як одного з етапів) і задачі оптимального розбиття множин. Відзначено їх особливості та труднощі, які виникають в процесі розв'язування комбінованих видів задач. Виділено актуальні напрямки дослідження.

Ключові слова: задачі розміщення-розподілу, оптимізація, задачі оптимального розбиття множин, багатоступінні задачі, математичні моделі.

ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ-РАСПРЕДЕЛЕНИЯ**Ус. С.А., Станина О.Д.**

В статье рассмотрены задачи размещения-распределения, которые возникают при стратегическом планировании развития региона и представляют интерес для коммерческих и государственных компаний. Проанализирован процесс формирования и развития таких задач. Представлены их классификации в зависимости от: спроса, количества видов продукции, размещаемых объектов и вида области, в которой осуществляется размещение. Сформулирована общая постановка и приведены основные математические модели задач размещения-распределения. Описаны методы и подходы к решению таких задач. Особое внимание уделено бесконечномерным задачам размещения-распределения, а именно непрерывным задачам оптимального разбиения множеств. В этих задачах область, в которой проводится размещение объектов, представляет собой некоторое множество, непрерывно заполненное потребителями (или производителями) определенного вида продукции. Отдельно рассмотрена связь задач оптимального разбиения множеств с многоэтапными задачами размещения-распределения на примере двухэтапной задачи. Представлена математическая модель многоэтапной задачи размещения, которая является комбинацией дискретной задачи размещения (как одного из этапов) и задачи оптимального разбиения множеств. Отмечено их особенности и трудности, которые возникают в процессе решения комбинированных видов задач. Выделены актуальные направления исследования.

Ключевые слова: задачи размещения-распределения, оптимизация, задачи оптимального разбиения множеств, многоэтапные задачи, математические модели.

*Холковський Ю.Р.***ДИСКРЕТНО-ІНТЕРПОЛЯЦІЙНИЙ МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ, СИСТЕМ ТА СЕРЕДОВИЩ****Національний авіаційний університет України, м. Київ**

Проектування складних технічних об'єктів, моделювання прогнозованого стану багатопараметричних систем і середовищ, наприклад екологічних, енергетичних, кліматичних, гідрологічних, геоморфологічних, геологічних систем у теперішній час є досить складною задачею в зв'язку з розвитком сучасних технологій. Такі системи або середовища досить складні і мають велику кількість різноякісних параметрів. Пошук і створення математичних моделей таких систем є актуальною задачею. Очевидно, що об'єкти, системи і середовища, що моделюються, і які не піддаються аналітичному опису, можуть бути описані за допомогою дискретних моделей. Метою даного дослідження є розробка методів і алгоритмів побудови дискретних математичних моделей складних багатопараметричних об'єктів, систем і середовищ. У даній роботі розглядається нетрадиційний підхід щодо моделювання складних технічних об'єктів, систем і середовищ, який базується на дискретно-інтерполяційному методі. Відповідні геометричні моделі будуються як деякі однопараметричні множини з використанням певних інтерполяційних схем. Оригінальність підходу полягає в тому, що під вузлами інтерполяції розуміються не точки, а більш складні об'єкти, такі як лінії, поверхні, матриці або навіть певні процеси, представлені у вигляді деяких функціоналів, як сукупності їх властивостей і параметрів. Отримані таким чином однопараметричні множини, що включають різноякісні і різноструктурні параметри, є дискретними математичними моделями багатопараметричних об'єктів, процесів і середовищ.

Ключові слова: інтерполяція, однопараметрична множина, вузол інтерполяції, дискретні функції, багатовимірні інтерполяція, дискретно-інтерполяційна матриця.

Постановка проблеми

Складні багатопараметричні процеси, системи та середовища відносяться до такого класу об'єктів та систем, що доволі складно описати аналітично, тобто у вигляді континуальної математичної моделі і, відповідно, моделювати. Наприклад, складні просторові криволінійні форми, як моделі технічних та архітектурно-будівельних об'єктів, певні виробничі та природні процеси та середовища. Цілком зрозуміло, вони характеризуються, по-перше, великою кількістю параметрів, по-друге, ці параметри, і саме це найбільш суттєво, як правило мають різноманітну структуру та різноякісні властивості. Також необхідно додати, що зазначені властивості параметрів часто мають певну анізотропію у часі або у просторі. Побудова неперервних аналітичних, тобто континуальних математичних моделей таких об'єктів, систем та середовищ прак-

тично є неможливою задачею. В той же час подібні об'єкти, системи і середовища є досить широко розповсюдженими, і вони використовуються у сучасних інженерних конструкціях, розробках, технологіях та різного роду наукових дослідженнях. Задача вивчення, класифікації та дослідження таких систем, визначення їх параметрів та їх властивостей, а також прогнозування у часі й просторі стану багатопараметричних систем і середовищ є досить актуальною задачею. Очевидно, що для розв'язання подібного роду задач необхідна розробка певних раціональних алгоритмів і методів та на їх основі подальше створення математичних моделей і, відповідно, моделювання багатопараметричних об'єктів, систем і середовищ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз сучасної наукової літератури у галузі математичного моделювання показує, що

випадки розглядання питань геометричного моделювання багатопараметричних об'єктів, систем та середовищ, побудови їх математичних моделей будь-якого типу зустрічаються досить рідко. Особливо це стосується таких багатопараметричних систем і середовищ, як, наприклад, екологічні, геологічні, енергетичні, кліматичні, гідрологічні, геоморфологічні системи тощо, які відрізняються великою кількістю різноманітних і різноякісних параметрів, і для яких аналіз і прогнозування стану є вкрай важливими практичними задачами.

Зазначимо, що алгоритми та методи геометричного моделювання складних багатопараметричних систем і середовищ з побудовою їх математичних, а саме, дискретних моделей у літературних джерелах практично відсутні. Таким чином, відповідно, можливо сформулювати наступні цілі дослідження.

Формулювання мети дослідження

Досить часто задачі геометричного моделювання об'єктів, процесів, систем і середовищ містять у собі необхідність побудови певних однопараметричних множин. Таким об'єктом може бути деяка поверхня, як геометрична модель складної просторової криволінійної технічної форми, що застосовуються у техніці, будівництві, архітектурі. Це може бути поверхня, як геометрична модель складного багатопараметричного процесу чи середовища, або ж деяка гіперповерхня, як n -вимірна модель певної системи чи середовища, що задана аналітично або дискретно. Як було зазначено вище, побудова неперервних аналітичних, тобто континуальних математичних моделей складних об'єктів, систем та середовищ практично неможлива. Вихід із такої ситуації, як правило, спонукає переходити до побудови різноманітних дискретних моделей з певним рівнем адекватності. Добре відомо, що саме дискретний спосіб надання інформації про об'єкт, систему чи середовище, що моделюються, є універсальним, і на цій основі може бути раціональним [1–2].

Аналіз і вивчення складних багатопараметричних об'єктів, процесів, систем і середовищ, розробка методів та раціональних алгоритмів побудови дискретних математичних моделей щодо моделювання таких систем та середовищ і є метою дослідження.

Викладення основного матеріалу дослідження

При моделюванні складних багатопараметричних об'єктів систем та середовищ, що не піддаються аналітичному опису часто доцільно та раціонально використовувати саме дискретні

математичні моделі, що являють собою певні множини у вигляді деяких чисельних масивів, і які, в свою чергу, можуть бути надані у вигляді дискретних геометричних моделей (точкових або ж лінійних) [1–2]. Проведені дослідження показують, що подібні моделі як раз оптимально підходять для подальшої алгоритмізації, формалізації та проектування. Це пов'язано, у першу чергу, з подальшим розвитком та суттєвим ускладненням таких об'єктів, процесів, систем та середовищ, із великим рівнем їх параметричності, а також різноманітності та різноякісності їх параметрів.

В роботі пропонується оригінальний і нетрадиційний підхід щодо моделювання багатопараметричних об'єктів, процесів та середовищ, що базується на використанні дискретно-інтерполяційного методу. Розглянемо його сутність.

По-перше, у якості інструментального середовища були використані інтерполяційні поліноми Лагранжа. Зрозуміло, виникає питання: чому саме поліноми Лагранжа? На нашу думку, вибір саме інтерполяційних поліномів Лагранжа серед певної кількості інших інтерполяційних поліномів є оптимальним, і ось чому: саме обумовленість необов'язкового рівномірного розташуванням вузлів інтерполяції, можливість надання за кожною змінною своєї кількості вузлів інтерполяції. Досить важливим чинником є також і фактор стійкості та збіжності поліномів Лагранжа.

По-друге, на основі запропонованого методу та інтерполяційних поліномів Лагранжа були побудовані різноманітні інтерполяційні схеми, що характеризуються певною кількістю вузлів інтерполяції і, що є найголовнішим, саме характером самих вузлів інтерполяції. Відповідно, отримані таким чином інтерполяційні схеми дозволяють отримати, у випадку, наприклад, одновимірної інтерполяції, однопараметричну множину певних об'єктів, чи навіть процесів чи середовищ. У випадках більш складних систем та середовищ можливе й доцільне застосування багатовимірної інтерполяції.

По-третє, що є найголовнішим і складає оригінальність та нетрадиційність методу, під вузлами інтерполяції у запропонованому нами підході розуміються не точки, як у класичному математичному розумінні у випадку інтерполяції, а більш складні математичні об'єкти, а саме, лінії та поверхні, або ж, навіть, певні процеси, системи і середовища, що надані у вигляді деяких функціоналів, як сукупності їх властивостей та параметрів. Такий підхід дозволяє отримати дискретно-інтерполяційні моделі складних багато-

параметричних об'єктів, процесів, систем та середовищ у вигляді деяких одно- чи багатопараметричних множин, у чому власне й полягає оригінальність запропонованого дискретно-інтерполяційного методу.

У будь-якому інтерполяційному процесі дуже важливим є фактор схеми інтерполяції. При нашому підході під схемою інтерполяції розуміється схема розташування саме вищевказаних вузлів інтерполяції, тобто у вузол інтерполяції розміщується певний дискретний чисельний масив у вигляді матриці.

У науковій та інженерній літературі взагалі відсутній такий підхід щодо моделювання складних багатопараметричних об'єктів, систем і середовищ, таких, як, наприклад, екологічні системи і середовища, екологічні ситуації, геологічні, енергетичні, кліматичні, гідрологічні, геоморфологічні процеси, явища чи середовища.

Одно- чи багатопараметричні множини, як певна сукупність, навіть, різноякісних і різноструктурних параметрів, отримані таким чином, саме й є дискретними математичними моделями певних процесів, систем і середовищ [1].

Зазначимо, що базисним елементом таких множин є певна дискретна функція або функціонал. У загальному випадку вони можуть бути надані, як дискретні чисельні масиви, розмірність яких може варіюватись. До речі, це фактор також є досить важливим, тому що підкреслює досить велику варіативність методу.

Надалі інтерполювання функцій, що можуть бути задані неявно чи параметрично, фактично зводиться до розміщення у вузлах інтерполяції, наприклад, певних рівнянь, якщо, зазвичай, можливий аналітичний спосіб завдання, чи певних дискретних масивів у вигляді матриць, та отримання деякого функціонала $\Phi(p_{i,j})$ з вектором параметрів, що включає в себе інтерполяційний параметр, координатні змінні, параметри, що характеризують форму та положення об'єктів, певні параметричні характеристики процесів, систем та середовищ, а саме: нехай $F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_k, \dots, p_m)$ – багатопараметрична неявно задана функція. Сформуємо її у вигляді деякого функціонала $\Phi(p_{i,j})$, що заданий матрицею $M[i, j]$. Тоді

$$F(p_1, p_2, p_3, \dots, p_k, \dots, p_m) = \Phi(p_{i,j}) = M[i, j],$$

де $p_1, p_2, p_3, \dots, p_k, \dots, p_m$ – різноструктурні та різноякісні параметри (наприклад, показники забруднення, рівень концентрації певних речовин, врахування природних особливостей середовищ

тощо), а $M[i, j]$ (1) визначається, як:

$$M[i, j] = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & \dots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & \dots & p_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{m,1} & p_{m,2} & \dots & \dots & p_{m,n} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Тобто $M[i, j]$ є вузловою дискретно-інтерполяційною матрицею [3].

Стає зрозумілим, що запропонований метод на основі дискретно-інтерполяційного підходу дозволяє включати в одно- чи багатопараметричну множину параметри та характеристики систем, процесів і середовищ, що мають різну структуру і, навіть, властивості.

Остання теза є надзвичайно важливою, тому що цікавим наслідком з неї впливає застосування запропонованого підходу щодо моделювання різного роду об'єктів, явищ, процесів і середовищ, що характеризуються великою кількістю різноякісних параметрів, які часто практично просто неможливо функціонально поєднати у звичайній аналітичній математичній моделі. Наприклад, саме такою, власне кажучи, й є, задача визначення прогнозованого стану певної екологічної системи чи середовища, геологічної, енергетичної, гідрологічної, геоморфологічної системи тощо і, відповідно, визначення рівня екологічної безпеки цих систем.

Цілком зрозуміло, що дискретний підхід можна вважати більш загальним, тому що від неперервно-аналітичної, себто континуальної, моделі практично завжди можна перейти до дискретної. У нашому випадку можемо перейти саме до дискретно-інтерполяційної моделі.

Це дає можливість отримати деякий функціонал $\Phi(p_{i,j})$, з вектором параметрів, що включає в себе інтерполяційний параметр, координатні змінні, параметри, що характеризують стан, структуру, положення екологічних, геологічних, гідрологічних, геоморфологічних, енергетичних об'єктів, певні параметричні характеристики процесів та систем [3].

Розглядаючи (1) у якості певного вузла інтерполяції, використаємо інтерполяційний поліном Лагранжа і в випадку одновимірної інтерполяції отримаємо $\Phi(p_{i,j})$ (2) як:

$$\Phi(p_{i,j}) = \sum_{i=0}^{n-1} M_i(i, j) \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n-1} \frac{u - u_j}{u_i - u_j}, \quad (2)$$

де u – параметр інтерполяції, наприклад, певний вектор спрямованості; n – кількість вузлів інтерполяції.

Вираз $\Phi(p_{i,j})$, що являє собою узагальнену дискретно-інтерполяційну матрицю [3], є дискретною геометричною моделлю певної системи чи середовища.

Отже, при використанні запропонованого дискретно-інтерполяційного методу інтерполяційний поліном Лагранжа (3) набуває такого вигляду:

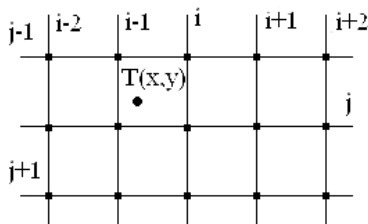
$$\Phi(u)_n = \sum_{i=0}^{n-1} F_i(p_1, p_2, \dots, p_m) \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n-1} \frac{u - u_j}{u_i - u_j}, \quad (3)$$

де u – параметр інтерполяції; $F(p_1, p_2, \dots, p_k)$ – вузлова функція; p_1, p_2, \dots, p_k – параметри вузлової функції; n – кількість вузлів інтерполяції.

Багатопараметричні об'єкти, системи і середовища, наприкладі екологічних, геологічних, гідрологічних, геоморфологічних, енергетичних тощо систем, можуть бути настільки складними структурно й параметрично, що використання апарата одновимірної інтерполяції може виявитися недостатнім. У таких випадках пропонується використати апарат, наприклад, двовимірної інтерполяції. Враховуючи саме запропонований дискретно-інтерполяційний метод геометричного моделювання, ось у чому полягає його сутність.

Вид степеневого многочлена $\Phi_{m,n}(u,v)$ степеня m по u та n по v для вирішення певної прикладної чи інженерної задачі, наприклад, можна знайти, визначивши значення функціонала F у довільній точці з параметрами (u,v) . Геометрично це означає, що при двовимірній інтерполяції через кожен вузлову точку буде проходити деяка поверхня $z = \Phi_{m,n}(u, v)$.

Якщо побудувати регулярну сітку та задати у вузлах сітки значення функції z , то вся область розпадається на $m \cdot n$ прямокутників, в один з яких і потрапить точка (u,v) (рисунок).



Регулярна сітка при двовимірній інтерполяції

Наступним кроком є інтерполяція при різних u_i , але фіксованих v_j , після чого необхідно перейти до v_{j+1} і повторити знову всю процедуру. Отже, отримуємо двовимірну інтерполяцію $\Rightarrow P_{m,n}(x, y)$ степеня m по x і степеня n по y у довільній точці $T(x, y)$.

Через вузлові точки проводиться деяка поверхня $z = P_{m,n}(x, y)$. Таким чином можемо отримати таку формулу (4) двовимірної інтерполяції за Лагранжем для побудови дискретних моделей складних багатопараметричних об'єктів, систем та середовищ:

$$P_{m,n}(x, y) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n-1} z(x_j, y_j) \prod_{\substack{p=0 \\ p \neq i}}^{m-1} \prod_{\substack{q=0 \\ q \neq j}}^{n-1} \frac{(x - x_i)(y - y_j)}{(x_p - x_i)(y_q - y_j)}. \quad (4)$$

Зазначимо, що у найбільш загальному випадку при n -вимірній інтерполяції через вузлові точки проходить деяка гіперповерхня, що являє собою многочлен n змінних, а формула буде мати складніший, але, зрозуміло, аналогічний вигляд.

Інтерполяційний поліном, як відомо, фактично є зрізаним рядом (аналогом ряду Тейлора) у наслідок того, що він обмежений степенем n . Звідки випливає, що важливим фактором є введення певного критерію інтерполяції. Тому для збіжності відповідного аналога ряду Тейлора необхідно спадання абсолютної величини коефіцієнта при u з ростом степеня u . Як відомо, критерієм гарної апроксимації у випадку багатовимірної інтерполяції є спадання абсолютних величин похідних по всім змінним із зростанням їх порядку.

Отже, запропонований метод на основі дискретно-інтерполяційного підходу може бути досить ефективним при моделюванні об'єктів, процесів і середовищ, що характеризуються великою кількістю різноструктурних і різноякісних параметрів. Наприклад, при моделюванні багатопараметричного середовища, яким є певна, наприклад, екологічна система, можуть бути розглянуті задачі якісного й кількісного оцінювання впливу забруднення на навколишнє середовище з часом і у просторі, прогнозованого стану цієї та подібних систем. Відповідно, можна сформулювати такі перспективні задачі щодо вивчення та моделювання екологічних ситуацій у певних екологічних, геологічних, енергетичних, гідрологічних, геоморфологічних тощо системах чи середовищах:

- аналіз, наприклад, екологічного чи іншого стану певного середовища;
- визначення загального рівня шкідливості різного роду систем і середовищ;
- визначення й локалізація місць найбільшого та найменшого забруднення цих систем;
- динамічне та довгострокове прогнозування стану і, наприклад, забруднення навколишньої території.

Висновки

Таким чином, запропонований метод на основі дискретно-інтерполяційного підходу дає можливість моделювати складні багатопараметричні об'єкти, процеси, системи і середовища, що характеризуються великою кількістю різноманітних і різноякісних параметрів і властивостей, прогнозувати поведінку систем і середовищ, передбачати розвиток процесів у них.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Холковський Ю.Р. Інтерполяція дискретних масивів у загальному випадку як спосіб моделювання багатопараметричних об'єктів та процесів // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – Вип. 4. – Т. 51. – С.156-160.
2. Холковський Ю.Р. Дискретно-інтерполяційний підхід при моделюванні багатопараметричних екологічних систем // Соціально-економічні та екологічні проблеми горної промисловості, будівництва і енергетики: Сборник матеріалів 9-ої Міжн. конф. – Мінск. – 2013. – С.268-272.
3. Холковський Ю. Р. Дискретно-інтерполяційна еко-матриця, як геометрична модель багатопараметричних процесів та систем в екології // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. «Прикладна геометрія та інженерна графіка». – Мелітополь: ТДАТУ, 2012. – Вип. 4 – Т.55. – С. 308-311.

Надійшла до редакції 10.10.2016

Рецензент: д.т.н., проф. Ковальов Ю.М.

ДИСКРЕТНО-ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СИСТЕМ И СРЕД

Холковский Ю.Р.

Проектирование сложных технических объектов, моделирование прогнозируемого состояния многопараметрических систем и сред, например экологических, энергетических, климатических, гидрологических, геоморфологических, геологических систем в настоящее время является довольно сложной задачей в связи с развитием современных технологий. Такие системы или среды достаточно сложны и имеют большое количество разнокачественных параметров. Поиск и создание математических моделей таких систем является актуальной

задачей. Очевидно, что моделируемые объекты, системы и среды, которые не поддаются аналитическому описанию, могут быть описаны с помощью дискретных моделей. Целью данного исследования является разработка методов и алгоритмов построения дискретных математических моделей сложных многопараметрических объектов, систем и сред. В настоящей работе рассматривается нетрадиционный подход к моделированию сложных технических объектов, систем и сред, основанный на дискретно-интерполяционном методе. Соответствующие геометрические модели строятся как некоторые однопараметрические множества с использованием определенных интерполяционных схем. Оригинальность подхода заключается в том, что под узлами интерполяции понимаются не точки, а более сложные объекты, такие как линии, поверхности, матрицы или даже определенные процессы, представленные в виде некоторых функционалов, как совокупности их свойств и параметров. Однопараметрические множества, полученные таким образом, и включающие разнокачественные и разнотипные параметры, являются дискретными математическими моделями многопараметрических объектов, процессов и сред.

Ключевые слова: интерполяция, однопараметрическое множество, узел интерполяции, дискретные функции, многомерная интерполяция, дискретно-интерполяционная матрица.

DISCRETE INTERPOLATION METHOD FOR MODELING MULTIPARAMETRIC PROCESSES, SYSTEMS AND ENVIRONMENTS

Kholkovsky Yu. R.

The design of complex technical objects, the modeling of the predicted state of multiparametric systems and environments, for example, ecological, energy, climatic, hydrological, geomorphological, geological systems, is currently quite a challenge in connection with the development of modern technologies. Such systems or environments are quite complex and have a large number of different quality parameters. Finding and creating mathematical models of such systems is an urgent task. Obviously, simulated objects, systems and environments that can not be analytically described can be described using discrete models. The purpose of this study is the development of methods and algorithms for constructing discrete mathematical models of complex multiparametric objects, systems, and environments. In this paper, we consider a non-traditional approach to the modeling of complex technical objects, systems and environments, based on the discrete interpolation method. The corresponding geometric models are constructed as some one-parameter sets using certain interpolation schemes. The originality of the approach is that under the interpolation nodes, not points, but more complex objects, such as lines, surfaces, matrices or even certain processes, represented as some functionals, as a collection of their properties and parameters, are meant. Single-parameter sets obtained in this way and including different-quality and difference-structured parameters are discrete mathematical models of multiparametric objects, processes and environments.

Keywords: interpolation, one-parameter set, the host interpolated, discrete features, multivariate interpolation, discrete-interpolation matrix.

УДК 681.3.012

*Швачич Г.Г., Іващенко В.П., Іващенко О.В.***ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНА КОНЦЕПЦІЯ РОЗВ'ЯЗКІВ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ НА ОСНОВІ СХЕМ ПІДВИЩЕНОГО ПОРЯДКУ ТОЧНОСТІ****Національна металургійна академія України, м. Дніпро**

Статтю присвячено розподіленому моделюванню візуалізації векторів розв'язків прикладних задач на основі схем підвищеного порядку точності. Більш високе прискорення обчислень порівняно з кінцево-різницевим підходом ілюструється використанням аналітичних розв'язків, які дозволяють проводити обчислення одночасно та паралельно за всіма часовими шарами. Показано, що найбільш перспективним підходом до математичного моделювання прикладних задач слід вважати той, що ґрунтується на числово-аналітичних розв'язках. Виявлено, що ефективним засобом під час опрацювання прикладних задач в металургійному виробництві вважають застосування технологій паралельних обчислень на розподілених системах кластерного типу, що мають порівняно невелику вартість і досить легко масштабуються як за кількістю процесорів, так і за обсягом оперативної пам'яті. Розглянутий у даній роботі підхід до числово-аналітичної концепції візуалізації векторів у розв'язках прикладних задач дозволяє отримати будь-які необхідні дані для побудови гладких графіків або ізоліній на відповідних сітках. Максимальні ж паралельні форми алгоритму становлять предмет особливого інтересу, оскільки визначають мінімально можливий час реалізації алгоритму візуалізації. Для проведення обчислювальних експериментів на базі застосування багатопроцесорної обчислювальної системи розроблено пакет прикладних програм, що реалізує розв'язок коефіцієнтних обернених задач теплопровідності методом математичного моделювання. Пакет прикладних програм розроблено з урахуванням вимог об'єктно-орієнтованого програмування.

Ключові слова: багатопроцесорна обчислювальна система, прискорення, візуалізація, розподілене моделювання, чисельно-аналітичний розв'язок.

Постановка проблеми

Значне прискорення обчислень прикладних задач за рахунок кінцево-різницевих схем досягається за рахунок ефекту розпаралелювання. Проте на окрему увагу заслуговують чисельно-аналітичні алгоритми розв'язування прикладних задач. Більш високе прискорення обчислень порівняно з кінцево-різницевим підходом можна досягти використанням аналітичних розв'язків, які дозволяють виконувати обчислення одночасно та паралельно за всіма часовими шарами та не використовують при цьому комбіновану пам'ять.

Отже, найбільш перспективним підходом до математичного моделювання прикладних задач слід вважати той, що ґрунтується на чисельно-аналітичних розв'язках.

Ефективним засобом під час опрацювання

прикладних задач в металургійному виробництві вважають застосування технологій паралельних обчислень на розподілених системах кластерного типу, що мають порівняно невелику вартість і досить легко масштабуються як за кількістю процесорів, так і за обсягом оперативної пам'яті [1,2].

Отже, розподілене моделювання візуалізації векторів розв'язків прикладних задач на основі схем підвищеного порядку точності є задачею важливою та актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Процеси, які відбуваються в агрегатах металургійного виробництва слід розглядати як великі системи [3–5]. Відзначимо, що на сьогодні розв'язування складних, великих за обсягом задач вимагає потужних комп'ютерів і характеризується словом паралельний, тобто існу-

ють паралельні комп'ютери, обчислювальні системи, паралельні обчислювальні методи тощо [6–8]. У широкий вжиток цей термін увійшов майже відразу після появи перших комп'ютерів, а точніше, після усвідомлення того факту, що створені комп'ютери не в змозі розв'язати протягом оптимального терміну багато актуальних для практики задач. Появу в обчислювальних системах нових і високовартісних засобів комунікації, більш досконалої елементної бази стимулював розвиток високопродуктивних обчислень на базі багатопроцесорних обчислювальних систем [9,10].

Крім того, відзначимо, що клас задач, який розглядається в даній роботі, як правило, розв'язується на основі застосування апарата різницевих рівнянь, суть якого полягає в тому, що здійснюється заміна похідних різницевиими співвідношеннями. При цьому з точки зору чисельного алгоритму розв'язок різницевих рівнянь розподіляється на явні та неявні схеми [11]. У явній схемі значення шуканої функції визначаються послідовно, шар за шаром. Проте, незважаючи на очевидну простоту та зручність обчислень, така схема має один істотний недолік. Якщо розміри сітки $l > h$, то похибки округлення можуть стати настільки великими, що отриманий розв'язок втрачає сенс. Відомо, що для застосування явної схеми повинна виконуватися умова: $l/h^2 \leq 0,5$. Але справедливим виявляється таке емпіричне правило: якщо зменшувати величини l і h , то похибка апроксимації частинних похідних кінцево-різницевиими похідними теж зменшуватиметься. Проте, чим дрібнішою буде сітка, тим ще більше обчислень необхідно зробити, а це означає, що тим більшими будуть похибки округлення. Неявні схеми дозволяють вести обчислення з великим кроком без істотного погіршення точності, але такий підхід вимагає більшого обсягу обчислень.

Розглянутий аналіз показує, що методи розв'язку даного класу задач мають бути не тільки різноманітними, але й поєднувати кількісні оцінювання з можливостями якісного аналізу. На сьогодні намітилися певні тенденції в розробці чисельно-аналітичних методів із складною логічною структурою, але вони мають порівняно з кусково-різницевиими методами вищий порядок точності й можливість побудови алгоритмів з адаптацією за порядками апроксимації [12,13]. З погляду обчислення цей підхід відрізняється деякою громіздкістю, але він показує своєрідний еталон для порівняння з іншими практичними методами. Разом з тим,

зважаючи на те, що обчислювальний експеримент здійснюється на багатопроцесорній системі, можна стверджувати, що обставина, яка стримує розвиток чисельно-аналітичного підходу, тепер втрачає свою актуальність. У зв'язку з цим у даній роботі набула подальшого розвитку ідея розробки схем підвищеного порядку точності на основі чисельно-аналітичного підходу до обчислень широкого класу досліджуваних задач.

Мета дослідження

Мета дослідження полягає в розробці чисельного розв'язку задачі металургійної теплофізики на основі застосування багатопроцесорних систем. Окрему увагу необхідно приділити чисельно-аналітичним алгоритмам розв'язування поставлених задач. Більш високе прискорення обчислень порівняно з кінцево-різницевим підходом виконати за рахунок застосування аналітичних розв'язків, які дозволяють проводити обчислення одночасно та паралельно за всіма часовими шарами без використання комбінованої пам'яті. Для виконання обчислювальних експериментів на основі застосування багатопроцесорної обчислювальної системи запропонувати пакет прикладних програм (ППП), що реалізує розв'язок коефіцієнтних обернених задач теплопровідності методом математичного моделювання. PPP розробити з урахуванням вимог об'єктно-орієнтованого програмування. При цьому розв'язок коефіцієнтних задач зводиться до задач оптимального керування, алгоритми обчислення яких закласти в пакеті. Також PPP повинен включати блок візуалізації даних.

Основні результати дослідження

Розглядається розв'язок крайової задачі для рівняння теплопровідності. Нехай потрібно знайти функцію, яка описується рівнянням вигляду:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (1)$$

при цьому

$$u(0, x) = 0, \quad u(t, 0) = 1, \quad u(t, 2) = 1. \quad (2)$$

Побудуємо рівномірну сітку, крок якої відповідно:

$$Dx1 = 0,01; \quad Dt1 = 0,001. \quad (3)$$

Нехай послідовний алгоритм реалізується за неявною схемою методом прогонки. Тоді після

дискретизації рівняння (1) отримують СЛАР вигляду:

$$U_{p,1} - U_{0,p,1} = \left(\frac{Dt1}{Dx1^2} \right) [U_{p+1,1} + U_{p-1,1} - 2U_{p,1}], \quad (4)$$

при цьому номери внутрішніх сіткових вузлів відповідають виразу: $p=1,2m-1$; шукані сіткові функції $U_{0,1}=1, U_{2m,1}=1, U_{p,1}$; значення величин $U_{0,p,1}$ беруться з попереднього часового шару.

Система лінійних алгебраїчних рівнянь виду (4) має тридіагональну структуру, а саме:

$$C_p U_{p+1,1} - U_{p,1} + D_p U_{p-1,1} = f_p, \quad (5)$$

при цьому

$$\left. \begin{aligned} C_p = B_p &= \left(\frac{Dt1/Dx1^2}{1 + Dt1/Dx1^2} \right), \\ f_p &= \left(\frac{-U_{0,p,1}}{1 + Dt1/Dx1^2} \right), \quad \text{якщо } p = \overline{1,2m-1} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Досить простий та зручний послідовний спосіб розв'язку різницевої крайової задачі (4)–(6) являє собою один із варіантів методу виключення невідомих за схемою Гауса й має назву методу прогонки. Мале число арифметичних операцій, а також досить слабка чутливість до обчислювальних похибок роблять прогонку дуже зручним засобом для реалізації послідовних обчислювальних алгоритмів.

Наведемо деякі аспекти обчислювального характеру при комп'ютерному моделюванні. При розв'язуванні нестационарних задач за допомогою неявних (або явних) методів розрахунки завжди ведуться за часовими шарами послідовно. Якщо вся інформація про сусідній шар поміщається в оперативну пам'ять, то особливих ускладнень не виникає. Але, якщо задача є настільки великою, що не відповідає викладеній раніше умові, то доводиться користуватися комбінованою пам'яттю. Час перенесення інформації з повільної пам'яті в оперативну є пропорційним числу точок у шарі. Час знаходження розв'язку задачі на черговому шарі також є пропорційним числу точок у шарі. Але період виконання однієї операції значно менший від середнього значення часу пересилання одиниці інформації з повільної пам'яті в оперативну. Тому при подібному обчисленні велика частина часу буде відводитися на організацію пересилань,

тобто витрачатись непродуктивно. Отже, виникає таке питання: чи можна якимось чином підвищити ефективність використання комп'ютерної пам'яті при розв'язуванні зазначеного класу задач? А якщо є можливість, то як? Відповіді на запитання можна отримати при більш детальному вивченні графа алгоритму розв'язку поставленої задачі. По-перше, очевидно, що таку проблему можна вирішити за рахунок паралельного процесора. А по-друге, особливості розпаралелювання задачі повинні бути такими, щоб час відповідних обчислень і обробка даних в оперативній пам'яті були б більшими за час, який відводиться на пересилання даних. Нарешті, для того, щоб позбутися від використання комбінованої пам'яті при розв'язуванні задачі (1), необхідно застосувати до такого рівняння або чисельно-аналітичний підхід, або один із методів математичної фізики, наприклад, інтегральне перетворення Лапласа за часом.

Згідно з чисельно-аналітичним підходом у кожному вузлі ($x=x_p$) сіткової області розв'язок заданого рівняння шукається в класі аналітичних функцій, які допускають його подання у вигляді ряду Тейлора, тобто:

$$u_{p+\varepsilon_x,1}(t, x) = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_x^n u_{p,n+1}(t), \quad (7)$$

при цьому нормована змінна:

$$\varepsilon_x = \frac{x - x_p}{x_{p+1} - x_p} \in [-1, 1], \quad (8)$$

невідомі тейлорівські компоненти шуканої функції u визначаються таким чином:

$$u_{p,n+1}(t) = \frac{(x_{p+1} - x_p)^n}{n!} \frac{\partial^n u}{\partial x^n} \Big|_{x=x_p}. \quad (9)$$

Після підстановки ряду (9) у співвідношення (7), використовуючи метод невизначених коефіцієнтів, одержимо систему диференціальних наслідків у формі системи звичайних диференціальних рівнянь (СЗДР). Розглядаючи отримане співвідношення як рекурентне за величиною n , можемо записати відповідні наслідки. Тоді загальний розв'язок рівняння (1) набуває вигляду:

$$u_{p+\varepsilon_{x,1}}(x,t) = \left\{ u_{p,1}(t) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varepsilon_x^{2n}}{(2n)!} \left(\frac{Dx1^2}{a} \right)^n \frac{\partial^n u_{p,1}(t)}{\partial t^n} \right\} - \frac{\varepsilon_x}{\lambda} \cdot \left\{ u_{p,2}(t) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varepsilon_x^{2n}}{(2n+1)!} \left(\frac{Dx1^2}{a} \right)^n \frac{\partial^n u_{p,2}}{\partial t^n} \right\}. \quad (10)$$

Необхідно відзначити, що обчислювальна система може використовуватися і для збільшення обсягу доступної оперативної пам'яті. Так, із збільшенням в N разів числа процесорів, у стільки ж збільшується й обсяг доступної оперативної пам'яті. Ця обставина стає вельми суттєвою під час розв'язку багатовимірних задач, коли виникають проблеми з пам'яттю обчислювального середовища (свопінг та ін.). Тому для більш повного аналізу ефективності розробленої багатопроекторної системи було здійснені обчислювальні експерименти при моделюванні багатовимірних задач.

Розглянемо особливості конструювання схем розщеплення для розподіленого моделювання прикладних задач. Для того, щоб з'явилася можливість переходу до суттєво більш складних алгоритмів, необхідно розроблену методологію поставити на фундаментальну теоретичну основу. Для цього можна використати різницеві схеми розщеплення як один із найбільш важливих засобів моделювання багатовимірних нестационарних задач математичної фізики. Різницеві схеми розщеплення – це один з важливих засобів розрахунку багатовимірних нестационарних задач математичної фізики. Річ у тім, що різницеві схеми, в яких число арифметичних дій, потрібних для переходу між часовими шарами, пропорційне числу невідомих значень шуканих функцій, прийнято називати економічними. Відомо, що обчислення за явними схемами дуже прості. Якість арифметичних дій у них не підлягає удосконаленню. Проте, будучи економічною, явна схема є стійкою тільки при жорсткому її обмеженні на крок сітки у часі. Різницеві схеми розщеплення на основі сукупності пропозицій, не зовсім еквівалентних одна одній, але таких, що мають стереотипну мету звести задачу тривимірного поширення області залежності до послідовності схем, включають невідомі величини, які діють поперемінно за координатними

напрямами і зводять розв'язок таких задач до скалярних прогонок. Тому різницева схема розщеплення вважається економічною і, безумовно, стійкою, тобто ніби поєднує в собі переваги явної і неявної схем.

Застосування числово-аналітичних розв'язків дозволяє для кожного часового шару проводити обчислення одночасно в будь-який момент, а, отже, не вимагає організації пересилання інформації з повільної пам'яті в оперативну, тобто виключається міжпроцесорний обмін даними. Цим і пояснюється суттєве прискорення розв'язування тих задач, які моделювалися за допомогою чисельно-аналітичних методів.

Нині набули значного поширення різні програмні продукти, які часто називають пакетами або комплексами програм. У даній роботі йдеться про пакет прикладних програм, призначений для обробки теплофізичних експериментів оберненими методами. Основна мета створення ППП – це надання практичної допомоги дослідникові на всіх етапах обробки теплофізичного експерименту оберненими методами за допомогою персонального обчислювального кластера. ППП використовується при плануванні й обробці результатів теплофізичного експерименту оберненими методами. Розроблені алгоритми, використані в ППП, досить просто перебудовуються на розв'язок інших коефіцієнтних і граничних ОЗТ.

Висновки

Розглянутий у даній роботі підхід до чисельно-аналітичної концепції візуалізації векторів у розв'язках дозволяє отримати будь-які необхідні дані для побудови гладких графіків або ізоліній на відповідних сітках. Максимальні ж паралельні форми алгоритму становлять предмет особливого інтересу, оскільки визначають мінімально можливий час реалізації алгоритму візуалізації.

Для здійснення обчислювальних експериментів на базі застосування багатопроекторної обчислювальної системи розроблено пакет прикладних програм, що реалізує розв'язок коефіцієнтних обернених задач теплопровідності методом математичного моделювання. ППП розроблено з урахуванням вимог об'єктно-орієнтованого програмування. При цьому обчислення коефіцієнтних ОЗТ зводиться до задач оптимального керування, алгоритми розв'язку яких реалізовано в цьому ППП. Зауважимо, що ППП також включає блок візуалізації даних.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Башков Є.О., Іващенко В.П., Швачич Г.Г. Високопродуктивна багатопроцесорна система на базі персонального обчислювального кластера // Проблеми моделювання та автоматизації проектування. – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – Вип. 9 (179). – С.312-324.
2. Швачич Г.Г., Ткач М.А., Щербина П.А. Суперкомпьютеры и высокопроизводительные вычисления // Будущее проблемите на световната наука: материали за 4-а межд. практична конф. – София. – 2008. – Т. 21. Съвременни технологии на информации. – С.22-27.
3. Коздоба Л.А. Вычислительная теплофизика. – Киев: Наук. Думка, 1992. – 224 с.
4. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
5. Роуч П. Вычислительная гидромеханика: пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
6. Букатов А.А., Дацюк В.Н., Жегуло А.И. Программирование многопроцессорных вычислительных систем. – Ростов-на-Дону: Изд-во ООО «ЦВВР», 2003. – 208 с.
7. Воеводин В.В. Математические модели и методы в параллельных процессах. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
8. Іващенко В.П., Швачич Г.Г., Шмукин А.А. Параллельные вычисления и прикладные задачи металлургической теплофизики // Системні технології: регіональний зб. наук. праць. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 3(56). – Т.1. – С.123-138.
9. Башков Е.А., Іващенко В.П., Швачич Г.Г. Перспективы применения современных коммуникационных технологий и исследование их влияния на эффективность многопроцессорных вычислительных систем // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 14 (188). – С.100-112.
10. Информационные системы и технологии: монография / В.П. Іващенко, Е.А. Башков, Г.Г. Швачич и др. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2011. – 302 с.
11. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966. – 724 с.
12. Швачич Г.Г. К вопросу конструирования параллельных вычислений при моделировании задач идентификации параметров окружающей среды // Математичне моделювання. – 2006. – № 2 (14). – С.23-34.
13. Швачич Г.Г., Шмукин А.А. Определение теплофизических свойств материалов на основе решений коэффициентных ОЗТ в экстремальной постановке // Теория и практика металлургии. – № 1, 2. – 2005. – С.104-108.

Надійшла до редакції 15.10.2016

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ РЕШЕНИЙ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ НА ОСНОВЕ СХЕМ ПОВЫШЕННОГО ПОРЯДКА ТОЧНОСТИ

Швачич Г.Г., Іващенко В.П., Іващенко Е.В.

Статья посвящена распределенному моделированию визуализации векторов решений прикладных задач на основе схем повышенного порядка точности. Высокое ускорение вычислений по сравнению с конечно-разностным подходом иллюстрируется использованием аналитических решений, которые позволяют проводить вычисление одновременно и параллельно по всем часовым слоям. Показано, что наиболее перспективным подходом к математическому моделированию прикладных задач следует считать тот, который основывается на численно-аналитических решениях. Выявлено, что эффективным средством решения прикладных задач в металлургическом производстве считают применение технологий параллельных вычислений на распределенных системах кластерного типа, которые имеют сравнительно небольшую стоимость и достаточно легко масштабируются как по количеству процессоров, так и по объему оперативной памяти. Рассмотренный в данной работе подход к численно-аналитической концепции визуализации векторов в решениях прикладных задач позволяет получить любые необходимые данные для построения гладких графиков или изолиний на соответствующих сетках. Максимальные же параллельные формы алгоритма представляют предмет особенного интереса, поскольку определяют минимально возможное время реализации алгоритма визуализации. Для проведения вычислительных экспериментов на базе применения многопроцессорной вычислительной системы разработан пакет прикладных программ, который реализует решение коэффициентных обратных задач теплопроводности методами математического моделирования. Пакет прикладных программ разработан с учетом требований объектно-ориентированного программирования.

Ключевые слова: многопроцессорная вычислительная система, ускорение, визуализация, распределенное моделирование, численно-аналитическое решение.

NUMERICAL-ANALYTICAL CONCEPTION OF DECISIONS OF THE APPLIED TASKS BASED ON CHARTS OF AN INCREASE ORDER OF EXACTNESS

Shvachych G.G., Ivaschenko V.P., Ivaschenko O.V.

The article is sanctified to the distributed modeling of visualization of decisions vectors of the applied tasks based on charts of an increase order of exactness. Higher acceleration of computation compared with the finite difference approach is illustrated by the use of analytical decisions that allow computation simultaneously and in parallel in all time layers. It is shown that the most promising approach to the mathematical modeling of applied tasks is one that is based on numerical-analytic decisions. It has been found that the application of parallel computing technologies in distributed cluster-type systems, having relatively low cost and easily scaled both by the number of processors and by the amount of RAM, is considered as an effective tool in the processing of applied tasks in metallurgical production. The approach considered in this work is the numerical-analytical concept of vectors visualization in the decisions of applied tasks that allows obtaining any necessary data for the construction of smooth charts or isolines on the corresponding grids. The maximum parallel forms of the algorithm are a subject of special interest, as they determine the minimum possible implementation time of the visualization algorithm. For computing experiments based on application of multiprocessor computing system the package of applied programs was developed to implement the decision of coefficient reverse tasks of heat-conduction by mathematical modeling method. The application package was developed taking into account the requirements of object-oriented programming.

Keywords: multiprocessor computer system, acceleration, visualization, distributed modeling, numerical and analytical decision.

Шейкус А.Р., Левчук И.Л., Тришкин В.Я.

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОЖИДКОСТНОГО ПИТАНИЯ ПРИ ПОДВИЖНОМ УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССАМИ РЕКТИФИКАЦИИ

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр

В работе представлены математические и алгоритмические основы расчета статических характеристик процесса многокомпонентной ректификации с учетом подвижных управляющих воздействий различной интенсивности. Так как подвижное управление заключается в переключении или перераспределении потока питания между контактными устройствами колонны, то интенсивность такого воздействия определяется характеристиками поступающего на разделение сырья. Решена задача расчета фазового состава питания, долей и энтальпий каждой из фаз, общей энтальпии питания на основании измерительной информации о температуре, расходе, составе сырья и давления в линии подачи его в колонну. Алгоритм решения содержит два итерационных цикла. Внешний цикл предназначен для расчета доли жидкой фазы в питании, внутренний позволяет определить составы паровой и жидкой фаз с использованием модели фазового равновесия. При расчетах энтальпии жидкой фазы используются коэффициенты активности компонентов, что обеспечивает применимость алгоритма при моделировании азеотропных смесей. Теоретически обоснован выбор качественных начальных приближений искомых величин, что позволяет отказаться от трудоемких методов итерационных расчетов в пользу метода простых итераций. Результаты имитационного моделирования, проведенного с использованием представленного алгоритма на примерах ректификационных колонн для разделения бинарной смеси метанол-вода и десятикомпонентной смеси продуктов синтеза метилтретбутилового эфира (МТБЭ), доказывают, что использование температуры питания в качестве интенсивности подвижного воздействия на процесс ректификации обеспечивает необходимую тепловую нагрузку колонны.

Ключевые слова: подвижное управление, процесс многокомпонентной ректификации, энтальпия смеси, МТБЭ.

Постановка проблемы

Процесс ректификации, широко применяемый в различных отраслях промышленности для разделения жидких смесей, характеризуется высокой энергоёмкостью и себестоимостью продуктов. Разделение обеспечивается многократными частичными испарениями и конденсациями фаз на контактных устройствах аппарата, что обуславливает его высокую распределённость как объекта управления. Системы управления таким объектом должны учитывать его особенности и обеспечивать необходимую интенсивность тепло- и массообмена в нужное время в нужном месте аппарата. Это достижимо использованием подвижных управляющих воздействий, отличие которых от традиционных состоит в

перемещении источника вещества и энергии в пространственной области установки [1].

Так как исследования технологических основ подвижного управления проводятся с использованием методов математического моделирования, то разработка адекватной математической модели и построение эффективных алгоритмов расчета ректификационных колонн с учетом подвижных управляющих воздействий является актуальной научной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций

Изменение точки нанесения воздействия по высоте ректификационной колонны может осуществляться путем переключения потока питания с одной тарелки на другую [2] или перераспределения сырья между двумя тарелками [3].

Интенсивность такого подвижного воздействия определяется расходом, составом и температурой подаваемой на разделение смеси.

В основу разрабатываемого математического обеспечения положено приведенное в работах [4] и [5] описание ректификационной колонны, в котором температура питания, определяющая теплосодержание подаваемых на разделение потоков, в балансовые уравнения контактных устройств и всей ректификационной установки не входит в явном виде. Алгоритмы расчета энтальпий, необходимые для исследования влияния температуры питания на качество продуктов разделения, требуют уточнения.

В зависимости от температуры, сырьевой поток может подаваться в колонну в виде недогретой или кипящей жидкости, конденсирующегося или перегретого пара, парожидкостной смеси. В любом случае его возможно разделить на жидкую и паровую фазы, каждая из которых также будет характеризоваться расходом, составом и энтальпией. Данные характеристики, зависящие от температуры питания, являются неизвестными величинами и требуют расчетов при определении общей энтальпии питания [6].

Так как жидкая и паровая фазы в питании находятся в состоянии равновесия, то основу разрабатываемого алгоритма составляют расчеты равновесных концентраций, температур кипения и конденсации фаз [7]. Подаваемые на разделение смеси являются неидеальными и, часто, азеотропными. Искомые характеристики питания необходимо рассчитывать с учетом теплового эффекта смешения [8] с использованием коэффициентов активности компонентов смеси.

Формулирование цели исследования

Целью работы является повышение эффективности подвижного управления процессом ректификации за счёт построения и интеграции в используемые математическое и алгоритмическое обеспечения алгоритма расчета характеристик питания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать алгоритм расчета характеристик потока сырья, подаваемого на разделение в колонну, на основании информации о расходе, составе и температуре питания.

2. С использованием разработанного алгоритма исследовать характер изменений параметров сырья в процессе его нагрева или охлаждения на примерах ректификационных колонн для разделения бинарной смеси метанол-вода и многокомпонентного продукта синтеза метил-

ретбутилового эфира (МТБЭ).

Изложение основного материала исследования

Поступающий на рассматриваемое контактное устройство ректификационной колонны поток питания F , состав которого x_f , может иметь различные фазовые состояния: недогретая жидкость, кипящая жидкость, парожидкостная смесь, конденсирующийся пар, перегретый пар. В общем случае, его можно условно разделить на жидкую и паровую фазы, каждая из которых характеризуется своими расходом, составом и энтальпией.

Между фазами парожидкостной смеси существует равновесие, при этом их составы (обозначены как x_F и y_F) связаны между собой зависимостью:

$$\overline{y_F} = \overline{y^*}(x_F, P_f). \quad (1)$$

Каждый из фазовых потоков в питании имеет свою энтальпию, зависящую от его температуры, состава, а также давления в линии подачи сырья:

$$h = \sum_{i=1}^n \left(x_i \cdot \int_0^t c_{x,i}(t) dt \right) - R \cdot T^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \ln \gamma_i}{\partial T} \cdot x_i \right), \quad (2)$$

$$H = \sum_{i=1}^n \left(y_i \cdot \left(\int_0^{t_{kun}} c_{x,i}(t) dt + r_i + \int_{t_{kun}}^t c_{y,i}(t) dt \right) \right). \quad (3)$$

Общая энтальпия питания пропорциональна долям каждой фазы в потоке сырья:

$$h_f = z \cdot h_F + (1 - z) \cdot H_F, \quad (4)$$

а количество тепла, вносимое в колонну рассчитываемым потоком питания, составит:

$$Q_f = F \cdot h_f = F \cdot (z \cdot h_F + (1 - z) \cdot H_F). \quad (5)$$

Неизвестными величинами (5) являются концентрации и жидкой x_F , и паровой фазы y_F питания, а также доли каждой из этих фаз z .

При расчёте энтальпии питания первоочередной задачей является определение температуры кипения жидкой смеси состава x_f , а также температуры конденсации парообразной смеси такого же состава. Если текущая температура потока питания t_f меньше или равна температуре кипения, то $z = 1$. Паровая фаза в питании

отсутствует, состав жидкой фазы соответствует составу питания, а энтальпия питания определяется согласно выражению (2), в котором $x_i = x_{f,i}$.

Если $t_{\text{кип}} < t_f < t_{\text{кон}}$, то питание подается на моделируемую тарелку в парожидкостном виде. Исходя из уравнения материального баланса, коэффициент z рассчитывается по правилу рычага:

$$z = \frac{y_{F,i} - x_{f,i}}{y_{F,i} - x_{F,i}} = \frac{x_{f,i} - y_{F,i}}{x_{F,i} - y_{F,i}}. \quad (6)$$

Зависимости (1) и (6) образуют систему, которая позволяет для каждого значения z определить составы равновесных жидкостной и паровой фаз, а также температуру, при которой находится рассматриваемая парожидкостная смесь с таким фазовым распределением:

$$\begin{cases} \overline{x}_F = \overline{x}_f + (z-1) \cdot \overline{y}_F \\ \overline{y}_F = \overline{y}^* \left(\overline{x}_F, P_f \right) \end{cases}. \quad (7)$$

Внешний итерационный процесс алгоритма расчета энтальпии питания, которое подается в колонну в парожидкостном виде, предназначен для уточнения величины z , в то время как внутренний – для решения системы (7). Если рассчитанная для нового приближения z температура t совпадает с необходимой точностью с температурой потока питания t_f , то на основании полученных результатов по формулам (2)–(4) выполняется расчет энтальпии парожидкостной смеси.

Начальное приближение искомой величины z предлагается определять путем линеаризации зависимости, соединив точки температур начала кипения ($z=1$) и начала конденсации ($z=0$) отрезком прямой:

$$z^0 = \frac{t_{\text{кон}} - t_f}{t_{\text{кон}} - t_{\text{кип}}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{кон}}$ и $t_{\text{кип}}$ – рассчитанные на основании алгоритмов фазового равновесия температуры конденсации паробразной и кипения жидкой смеси состава x_f .

На основании начального приближения величины z^0 проводятся расчеты составов равновесных паровой и жидкой фаз в питании (7), а также температуры такой смеси t^0 . Если t^0

соответствует t_f с необходимой точностью, то задача решена. В ином случае необходимо уточнение z и повторение расчетов. При использовании метода простых итераций (с угловым коэффициентом b) выражение для расчета нового приближения z :

$$z^k = z^{k-1} + b \cdot \left(t^{k-1} - t_f \right), \quad k=1,2,\dots \quad (9)$$

Удачный выбор начального приближения коэффициента z (8) позволяет обеспечить высокую сходимость итерационных расчетов. В случае расходящегося итерационного процесса необходимо изменить значение углового коэффициента b , или, воспользовавшись методом Ньютона, рассчитывать оптимальные его значения на каждой итерации.

Система уравнений (7), решение которой проводится во внутреннем итерационном цикле, содержит $2 \cdot (n-1)$ неизвестную – концентрации компонентов в жидкой и паровой фазах питания. Концентрации последних, n -ых компонентов фаз определяются согласно положению, что сумма молярных концентраций в любом материальном потоке равна 1.

Решение такой системы возможно только в случае качественных начальных приближений, для выбора и обоснования которых рассмотрена ректификационная колонна разделения бинарной смеси метанол-вода. Питание содержит, к примеру, 30% метанола, а его температура составляет 82°C. На рис. 1 представлены кривые кипения и конденсации бинарной смеси метанол-вода – изобары $t-x$ и $t-y$, построенные для атмосферного давления.

Нижняя кривая HDFAJ носит название кривой кипения, под ней располагается область существования жидкой фазы. Верхняя кривая HBGCI – кривая конденсации, над ней расположена область перегретого пара. Между обеими кривыми находится область сосуществования равновесных жидкости и пара, гетерогенная область. Всякая смесь в этой области является парожидкостной и содержит одновременно две фазы.

Как видно из рис. 1, концентрации метанола в фазах при увеличении доли пара в парожидкостном питании снижаются: в жидкой фазе от x_f при $z=1$ до $x^*(y_f)$ при $z=0$ по кривой AFD; в паровой фазе от $y^*(x_f)$ при $z=1$ до y по кривой CGV. Диаграммы состояния для различных смесей имеют различный вид, однако, конечные точки кривых всегда совпадают с

начальной и равновесными концентрациями.

Если участок кривой AFD заменить отрезком прямой AD и принять допущение, что изменение величины z смещает точку состояния жидкой фазы вдоль отрезка равномерно, то начальное приближение концентрации i -ого компонента в жидкой фазе питания:

$$x_{F,i} = x_i^*(\bar{x}_f) - z \cdot (x_i^*(\bar{x}_f) - x_{f,i}) \quad (10)$$

Погрешности такого начального приближения стремятся к нулю на концах диапазона $z = 0 \dots 1$. Величина максимальной абсолютной погрешности будет зависеть от нелинейности участков изобар $t - x$ между рассматриваемыми концентрациями.

Далее с помощью алгоритма расчета фазового равновесия определяется состав паровой фазы в питании:

$$\bar{y}_F = y^*(\bar{x}_F, P_f)$$

и, совместно с этим, температура кипения/конденсации такой парожидкостной смеси.

Исходя из (7) дальнейшие уточнения концентраций жидкой фазы питания возможно осуществлять методом простых итераций:

$$x_{F,i} = x_{F,i} + d \cdot \left(\frac{x_{f,i} + (z-1) \cdot y_{F,i}}{z} - x_{F,i} \right), \quad (11)$$

где d – угловой коэффициент внутреннего итерационного цикла.

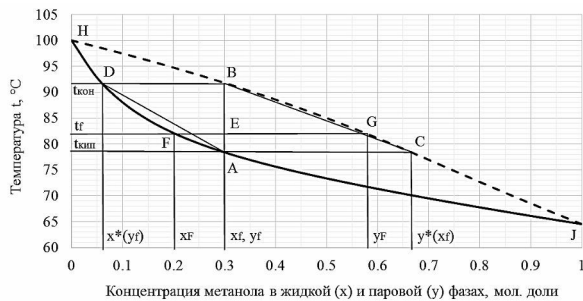


Рис. 1. Диаграмма состояния бинарного раствора метанол–вода

Условием окончания расчетов составов фаз в питании и перехода к определению нового, уточненного значения коэффициента z является выполнение с необходимой точностью условия:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \left| \frac{x_{f,i} + (z-1) \cdot y_{F,i}}{z} - x_{F,i} \right| = 0. \quad (12)$$

В случае системы метанол–вода, как видно из рис. 1, меньшими погрешностями характеризуется начальное приближение концентраций паровой фазы: участок кривой конденсации между точками В и С с высокой точностью совпадает с отрезком прямой, соединяющим данные точки. Систему (7) возможно преобразовать к виду:

$$\begin{cases} \bar{x}_F = \bar{x}_f - z \cdot \bar{x}_F; \\ \bar{y}_F = y^*(\bar{x}_F, P_f) \end{cases} \quad (13)$$

Тогда начальные приближения концентраций паровой фазы в смеси:

$$y_{F,i} = x_{f,i} - z \cdot (x_{f,i} - y_i^*(\bar{x}_f)). \quad (14)$$

В этом случае проводится итерационное уточнение концентраций компонентов паровой фазы парожидкостной смеси. Уравнения, аналогичные (11)–(12), без особых трудностей выводятся из (13).

В результате работы алгоритма определяются составы фаз парожидкостной смеси и их мольные доли в потоке питания. На основании полученных данных определяется энтальпия питания по уравнениям (2)–(4). Её произведение на расход питания F позволяет рассчитать количество тепла, вносящегося в колонну разделяемой смесью в единицу времени (5).

Приведенный алгоритм реализован на программном уровне и проведены исследования характеристик потоков питания и их изменений вследствие предварительного нагрева/охлаждения сырья перед подачей в колонну.

Бинарная смесь метанол–вода согласно нормам технологического процесса содержит 0,273 мольные доли метанола и подаётся на 9-ю тарелку ректификационной колонны [9]. На рис. 2 и 3 представлены результаты расчётов характеристик такого потока питания с тем допущением, что в линии подачи сырья в колонну давление соответствует атмосферному.

Температура начала кипения жидкой смеси такого состава при атмосферном давлении составляет 78,5°С, начала конденсации паробразной смеси – 92,85°С. Нагрев жидкой смеси до температуры кипения, а также перегрев пара

не требуют существенных энергетических затрат, участки энтальпийной кривой имеют незначительный угол подъёма. Совершенно другую картину представляет нагрев смеси в диапазоне температур кипения/конденсации, который сопровождается испарением части жидкой фазы (рис. 2). Зависимость коэффициента z от температуры смеси t_f нелинейная, что определяет нелинейность и энтальпийной кривой. Чем меньше жидкой фазы остаётся в парожидкостной смеси, тем большее количество тепла необходимо затрачивать для нагрева смеси.

Метанол в смеси метанол–вода является легкокипящим компонентом. При нагреве жидкой смеси сверх температуры начала кипения появившаяся паровая фаза обогащена метанолом: 66 мол.% в паре при 27,3 мол.% в жидкости на момент начала кипения (рис. 3). С увеличением доли пара в смеси (с уменьшением коэффициента z) концентрация метанола будет падать как в жидкой фазе, так и в паровой. При дальнейшем нагреве до температуры, соответствующей полному испарению, последние капли жидкости будут обогащены тяжелокипящим компонентом – водой, концентрация которой составит 94 мол.% Состав паровой фазы в парожидкостной смеси при нагреве стремится к первоначальному составу жидкой смеси.

С целью проверки работоспособности алгоритмов при моделировании многокомпонентной ректификации, а также изучения характеристик азеотропных смесей, исследовалась десятикомпонентная смесь, состоящая из следу-

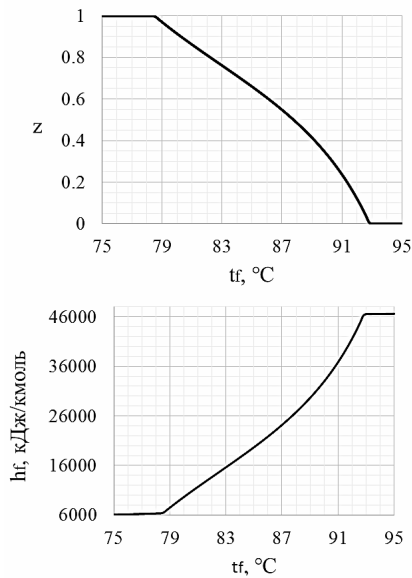


Рис. 2. Доля жидкой фазы z и энтальпия h_f смеси метанол–вода в зависимости от её температуры

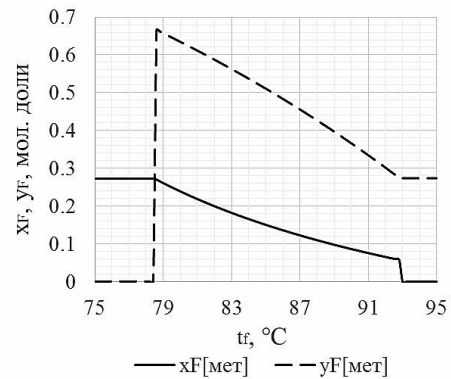


Рис. 3. Изменение составов жидкой (x_f) и паровой (y_f) фаз смеси метанол–вода в процессе её нагрева/охлаждения

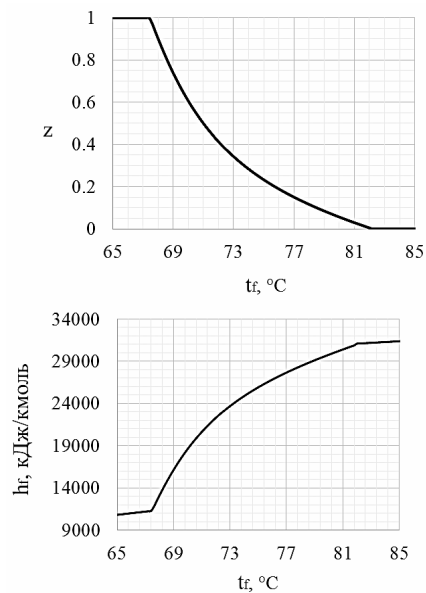


Рис. 4. Доля жидкой фазы z и энтальпия h_f десятикомпонентной смеси в зависимости от её температуры

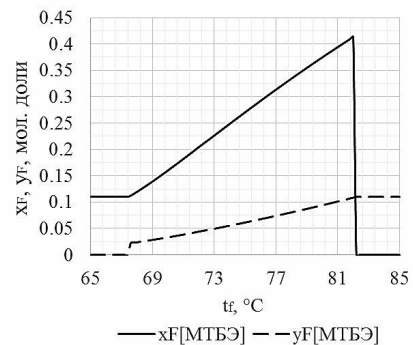


Рис. 5. Изменение концентрации МТБЭ в жидкой (x_f) и паровой (y_f) фазах десятикомпонентной смеси в процессе её нагрева/охлаждения

ющих компонентов: пропан (0,010053 мол. доли), н-бутан (0,079121), изобутан (0,54908), бутилен (0,088858), цис-бутен (0,04048), транс-бутен (0,070099), изобутилен (0,004375), пентан (0,006143), метанол (0,041645) и метилтретбутиловый эфир (МТБЭ). Результаты расчетов приведены на рис. 4, 5.

Данная смесь является продуктом синтеза МТБЭ и подвергается разделению в многотарельчатой ректификационной колонне, которая используется АО «Укртатнафта» в г. Кременчуг. Давление для расчетов, согласно регламенту, принималось равным 9,3 техническим атмосферам. Ключевым компонентом является целевой продукт – МТБЭ, который среди всех компонентов смеси наименее летучий.

Концентрации МТБЭ в жидкой и паровой фазах при нагреве изменяются практически линейно, однако, характер изменений противоположный. Так как МТБЭ является тяжелокипящим компонентом, то с увеличением доли пара в смеси (с уменьшением коэффициента z) концентрация МТБЭ будет возрастать как в жидкой фазе, так и в паровой. Состав паровой фазы в парожидкостной смеси при нагреве стремится к первоначальному составу жидкой смеси, однако снизу, а не сверху, как в случае легких компонентов. На нагрев данной парожидкостной смеси необходимо затратить тем больше тепла, чем меньше паровой фазы в смеси.

Выводы

Приведенный алгоритм позволяет рассчитывать характеристики многокомпонентной парожидкостной смеси, при этом количество компонентов существенно не влияет на число итераций как при определении долей жидкой и паровой фаз z , так и при расчётах фазового состава питания.

Имитационные исследования, проведенные с его использованием на примерах бинарной и многокомпонентной азеотропной смесей, показали существенные изменения характеристик питания ректификационных колонн при испарении части жидкой фазы.

Использование температуры питания в качестве интенсивности подвижного воздействия на процесс ректификации позволяет вносить в колонну необходимое количество тепла, а, значит, обеспечивать оптимальные расходы пара и орошения по высоте колонны и высокое качество продуктов разделения. Исследование статических характеристик ректификационных колонн по каналу «температура питания – состав конечных продуктов» с использованием разра-

ботанного обеспечения является направлением дальнейших исследований в области подвижного управления процессами ректификации.

Обозначения

n – количество компонентов в разделяемой смеси; x – мольная концентрация компонента в жидкой фазе; y – мольная концентрация компонента в паровой фазе; F – мольный расход питания, кмоль/ч; q – коэффициент перераспределения сырья между тарелками питания, кмоль/кмоль; Q – расход тепла, кДж/ч; h – теплосодержание (энтальпия) жидкой фазы, кДж/кмоль; H – теплосодержание (энтальпия) паровой фазы, кДж/кмоль; t – температура, °С; T – температура, К; z – доля жидкой фазы в питании, кмоль/кмоль; P – давление, МПа; γ – коэффициент активности; R – универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К); ΔH – теплота смешения, кДж/кмоль; c – молярная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кмоль·К); r – молярная теплота парообразования, кДж/кмоль; b, d – настроечные коэффициенты итерационных алгоритмов.

Нижние индексы: i – для рассматриваемого компонента смеси; f – для параметров питания; F – для параметров жидкой и паровой фазы питания отдельно; x – для параметров жидкой фазы; y – для параметров паровой фазы.

Верхние индексы: * – для равновесных параметров; 0 – параметры начальных расчетов итерационного процесса; k – номер итерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ранопорт Э.Я.* Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 2005. – 292 с.
2. *Белоброва Е.В., Шейкус А.Р., Корсун В.И.* Автоматическое управление теплообменными процессами с подвижными распределенными регулирующими воздействиями // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 5/2 (71). – С.51-55.
3. *Левчук И.Л., Шейкус А.Р., Тришкин В.Я.* Способ управления процессом ректификации с помощью распределенных управляющих воздействий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2015. – № 14 (1123). – С.100-105.
4. *Кафаров В.В., Глебов М.Б.* Математическое моделирование основных процессов химических производств: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 400 с.
5. *Комиссаров Ю.А., Дам Куанг Шанг.* Математическая модель и алгоритм расчета процесса ректификации много-

компонентных систем // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – Т.14. – № 9. – С.118-126.

6. Семиохин И.А. Физическая химия: учеб. – М: Изд-во МГУ, 2001. – 272 с.

7. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии: в 2-х ч. Ч. 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 304 с.

8. Белоусов В.П., Морачевский А.Г. Теплоты смешения жидкостей. – Л.: Химия, 1970. – 256 с.

9. Анисимов И.В., Бодров В.И., Покровский В.Б. Математическое моделирование и оптимизация ректификационных установок. – М.: Химия, 1975. – 216 с.

Поступила в редакцию 14.10.2016

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Косолап А.И.

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОРІДІННОГО ЖИВЛЕННЯ ПРИ РУХЛИВОМУ КЕРУВАННІ ПРОЦЕСАМИ РЕКТИФІКАЦІЇ

Шейкус А.Р., Левчук І.Л., Тришкін В.Я.

В роботі представлені математичні та алгоритмічні основи розрахунку статичних характеристик процесу багатокомпонентної ректифікації з урахуванням рухливого керування дії різної інтенсивності. Так як рухливе управління полягає в переключенні або перерозподілі потоку живлення між контактними пристроями колони, то інтенсивність такого впливу визначається характеристиками сировини. Вирішена задача розрахунку фазового складу живлення, часток і ентальпії кожної з фаз, загальної ентальпії живлення на підставі виміральної інформації про температуру, витрату, склад сировини і тиск в лінії подачі його в колону. Алгоритм рішення містить два ітераційні цикли. Зовнішній цикл призначений для розрахунку частки рідкої фази в живленні, внутрішній дозволяє визначити склади парової і рідкої фаз з використанням моделі фазової рівноваги. При розрахунках ентальпії рідкої фази використовуються коефіцієнти активності компонентів, що забезпечує можливість застосування алгоритму при моделюванні азеотропних сумішей. Теоретично обґрунтовано вибір якісних початкових наближень шуканих величин, що дозволяє відмовитися від трудомістких методів ітераційних розрахунків на користь методу простих ітерацій. Результати імітаційного моделювання, проведеного з використанням представленого алгоритму на прикладах ректифікаційних колон для поділу бінарної суміші метанол–вода і десятикомпонентної суміші продуктів синтезу метилтретбутилового ефіру (МТБЕ), доводять, що використання температури живлення в якості інтенсивності рухливого впливу на процес ректифікації забезпечує необхідне теплове навантаження колони.

Ключові слова: рухливе керування, процес багатокомпонентної ректифікації, ентальпія суміші, МТБЕ.

THE CALCULATING THE CHARACTERISTICS OF VAPOR-LIQUID FEED AT THE MOBILE CONTROL OF RECTIFICATION PROCESSES

Sheikus A.R., Levchuk I.L., Trishkin V.Ya.

The paper presents mathematical and algorithmic bases for calculating the static characteristics of the multicomponent rectification process, taking into account the mobile control actions of different intensity. Since mobile control consists in switching or redistributing the feed flow between the contact devices of the column, the intensity of such an impact is determined by the characteristics of the raw material entering on separation. The problem of calculating the phase composition of the feed flow, the proportion and enthalpies of each phase, the total enthalpy of feed based on the measurement information on temperature, consumption, the composition of the feed and the pressure in the feeding line is solved. The solution algorithm contains two iteration cycles. The outer cycle is designed to calculate the fraction of the liquid phase in the feed, the internal one allows to determine the compositions of the vapor and liquid phases using the phase equilibrium model. In calculating the enthalpy of the liquid phase, the activity coefficients of the components are used, which ensures the applicability of the algorithm in the modeling of azeotropic mixtures. The choice of qualitative initial approximations of the unknown quantities is theoretically justified, which makes it possible to abandon the laborious methods of iterative calculations in favor of the fixed-point iteration method. The results of simulation performed using the presented algorithm on examples of rectification columns for separating a binary methanol-water mixture and a ten-component mixture of methyl tert-butyl ether (MTBE) products prove that the use of the feed temperature as the intensity of the mobile effect on the rectification process provides the necessary heat load of the column.

Keywords: mobile control, multicomponent rectification process, enthalpy of mixture, MTBE.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

БАЮЛ Костянтин Васильович – к.т.н., с.н.с. відділу технологічного обладнання та систем управління Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро, Україна)

БІЛОШАПКА Олена Олексіївна – м.н.с. відділу технологічного обладнання та систем управління Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро, Україна)

БІЛЬКОВА Алла Іванівна – к.т.н., с.н.с. відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро, Україна)

БЄЛЯНОВСЬКА Олена Анатоліївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри енергетики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ВАЩЕНКО Сергій Володимирович – к.т.н., с.н.с. відділу технологічного обладнання та систем управління Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро, Україна)

ГОРБОНОС Павло Олександрович – студент факультету комп'ютерних наук та інженерії, спеціальність комп'ютерні науки, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ГРОД Інна Миколаївна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри інформатики і методики її викладання Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка (м. Тернопіль, Україна)

ДЬОМІЧЕВ Костянтин Едуардович – к.т.н., завідувач кафедри математичних, інформаційних та соціально-гуманітарних дисциплін Черкаської філії Європейського університету (м. Черкаси, Україна)

ЖУРАВЛЬОВА Ольга Ігорівна – к.ф.-м.н., доцент кафедри вищої математики ДВНЗ «Національний гірничий університет» (м. Дніпро, Україна)

ЗЕЛЕНЦОВ Дмитро Гегемонович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних систем ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ІВАЩЕНКО Валерій Петрович – д.т.н., професор, перший проректор Національної металургійної академії України (м. Дніпро, Україна)

ІВАЩЕНКО Олена Валеріївна – старший викладач кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки Національної металургійної академії України (м. Дніпро, Україна)

КОЛОМІЄЦЬ Олена Вікторівна – асистент кафедри енергетики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

КУПРІНА Лариса Олександрівна – старший викладач кафедри вищої математики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ЛЕВЧУК Ігор Леонідович – к.т.н., доцент, декан факультету комп'ютерних наук та інженерії, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та метрології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

МАЛЯВСЬКИЙ Микола Іванович – к.х.н., доцент, професор кафедри загальної хімії Національного дослідницького Московського державного будівельного університету (м. Москва, Росія)

МУРАВЙОВА Ірина Генадієвна – д.т.н., зав. відділом технологічного обладнання та систем управління Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро, Україна)

НАСОНОВА Світлана Сергіївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри вищої математики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

НАУМЕНКО Наталія Юріївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних систем ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

НАУМЕНКО Тетяна Станіславівна – викладач кафедри вищої математики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

НЕМЧИНОВ Сергій Ілліч – к.т.н., доцент, доцент кафедри матеріалознавства ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ОЛЕВСЬКА Юлія Борисівна – к.ф.-м.н., доцент кафедри вищої математики ДВНЗ «Національний гірничий університет» (м. Дніпро, Україна)

ОЛЕВСЬКИЙ Віктор Ісаакович – д.т.н., завідувач кафедри вищої математики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ПРЯДКО Наталія Сергіївна – д.т.н., с.н.с. інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України (м. Дніпро, Україна)

РАХМАНОВ Сулейман Рахманович – к.т.н., доцент, доцент кафедри теоретичної механіки і опору матеріалів Національної металургійної академії України (м. Дніпро, Україна)

СЕМЕНОВ Юрій Станіславович – к.т.н., с.н.с. відділу технологічного обладнання та систем управління Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро, Україна)

СОЛОДКА Наталія Олександрівна – к.т.н., доцент, науковий співробітник відділу технологічного обладнання та систем управління Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро, Україна)

СТАНІНА Ольга Дмитрівна – асистент кафедри інформаційних систем ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

СТЕБЛЯНКО Павло Олексійович – д. ф.-м. н., професор, завідувач кафедри вищої математики Дніпродзержинського державного технічного університету (м. Кам'янське, Україна)

СУХА Ірина Валеріївна – к.х.н., доцент, доцент кафедри хімічної технології високомолекулярних сполук ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

СУХИЙ Костянтин Михайлович – д.т.н., професор, декан факультету технології органічних речовин ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ТЕРНОВА Катерина Віталіївна – аспірант, Інститут технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і ДКАУ) (м. Дніпро, Україна)

ТОГОБИЦЬКА Дар'я Миколаївна – д.т.н., професор, зав. відділом фізико-хімічних проблем металургійних процесів Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро, Україна)

ТРИШКІН Владислав Якович – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп’ютерно-інтегрованих технологій та метрології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

УС Світлана Альбертівна – к.ф.-м.н., професор кафедри системного аналізу і управління Національного гірничого університету (м. Дніпро, Україна)

ХОЛКОВСЬКИЙ Юрій Романович – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп’ютерних технологій дизайну і графіки Національного авіаційного університету України (м. Київ, Україна)

ХУДЯКОВ Олександр Юрійович – к.т.н., с.н.с. відділу технологічного обладнання та систем управління Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро, Україна)

ШАПКА Ірина Віталіївна – викладач кафедри вищої математики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ШВАЧИЧ Геннадій Григорович – д.т.н., професор, завідувач кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки Національної металургійної академії України (м. Дніпро, Україна)

ШЕЙКУС Антон Романович – аспірант кафедри комп’ютерно-інтегрованих технологій та метрології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна)

ШУМЕЛЬЧИК Євгеній Ігорович – к.т.н., с.н.с. відділу технологічного обладнання та систем управління Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро, Україна)

ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК		ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ		NAME INDEX	
БАЮЛ К.В.	4	БАЮЛ К.В.	4	BAIUL K.V.	4
БІЛОШАПКА О.О.	25	БЕЛОШАПКА Е.А.	25	BELKOVA A.I.	25
БІЛЬКОВА А.І.	25	БЕЛЬКОВА А.И.	25	BELOSHAPKA E.A.	25
БЕЛЯНОВСЬКА О.А.	63	БЕЛЯНОВСКАЯ Е.А.	63	BELYANOVSKAYA E.A.	63
ВАЩЕНКО С.В.	4	ВАЩЕНКО С.В.	4	DYOMICHEV K.E.	56
ГОРБОНОС П.О.	14	ГОРБОНОС П.А.	14	GORBONOS P.A.	14
ГРОД І.М.	9	ГРОД И.Н.	9	HROD I.N.	9
ДЬОМІЧЕВ К.Е.	56	ДЕМИЧЕВ К.Э.	56	IVASCHENKO O.V.	85
ЖУРАВЛЬОВА О.І.	19	ЖУРАВЛЕВА О.И.	19	IVASCHENKO V.P.	85
ЗЕЛЕНЦОВ Д.Г.	14	ЗЕЛЕНЦОВ Д.Г.	14	KHOLKOVSKY Yu.R.	80
ІВАЩЕНКО В.П.	85	ИВАЩЕНКО В.П.	85	KHUDYAKOV A.Yu.	4
ІВАЩЕНКО О.В.	85	ИВАЩЕНКО Е.В.	85	KOLOMIYETS E.V.	63
КОЛОМІЄЦЬ О.В.	63	КОЛОМИЕЦ Е.В.	63	KUPRINA L.A.	31
КУПРИНА Л.О.	31	КУПРИНА Л.А.	31	LEVCHUK I.L.	90
ЛЕВЧУК І.Л.	90	ЛЕВЧУК И.Л.	90	MALIAVSKI N.I.	22
МАЛЯВСЬКИЙ М.І.	19	МАЛЯВСКИЙ Н.И.	19	MURAVYOVA I.G.	25
МУРАВЬОВА І.Г.	25	МУРАВЬЕВА И.Г.	25	NASONOVA S.S.	31
НАСОНОВА С.С.	31	НАСОНОВА С.С.	31	NAUMENKO N.Yu.	14
НАУМЕНКО Н.Ю.	14	НАУМЕНКО Н.Ю.	14	NAUMENKO T.S.	31
НАУМЕНКО Т.С.	31	НАУМЕНКО Т.С.	31	NEMCHYNOV S.I.	37
НЕМЧИНОВ С.І.	37	НЕМЧИНОВ С.И.	37	OLEVSKA J.B.	41
ОЛЕВСЬКА Ю.Б.	41	ОЛЕВСКАЯ Ю.Б.	41	OLEVSKIY V.I.	41
ОЛЕВСЬКИЙ В.І.	41	ОЛЕВСКИЙ В.И.	41	PRYADKO N.S.	68
ПРЯДКО Н.С.	68	ПРЯДКО Н.С.	68	RAHMANOV S.R.	48
РАХМАНОВ С.Р.	48	РАХМАНОВ С.Р.	48	SEMENOV Yu.S.	25
СЕМЕНОВ Ю.С.	25	СЕМЕНОВ Ю.С.	25	SHAPKA I.V.	41
СОЛОДКА Н.О.	4	СОЛОДКАЯ Н.А.	4	SHEIKUS A.R.	90
СТАНИНА О.Д.	3	СТАНИНА О.Д.	73	SHUMELCHIK E.I.	25
СТЕБЛЯНКО П.О.	56	СТЕБЛЯНКО П.А.	56	SHVACHYCH G.G.	85
СУХА І.В.	63	СУХАЯ И.В.	63	SOLODKA N.A.	4
СУХИЙ К.М.	63	СУХОЙ К.М.	63	STANINA O.D.	73
ТЕРНОВА К.В.	68	ТЕРНОВАЯ Е.В.	68	STEBLYANKO P.O.	56
ТОГОБИЦЬКА Д.М.	25	ТОГОБИЦКАЯ Д.Н.	25	SUKHAYA I.V.	63
ТРИШКІН В.Я.	90	ТРИШКИН В.Я.	90	SUKHYI K.M.	63
УС С.А.	73	УС С.А.	73	TERNOVAYA E.V.	68
ХОЛКОВСЬКИЙ Ю.Р.	80	ХОЛКОВСКИЙ Ю.Р.	80	TOGOBITSKAYA D.N.	25
ХУДЯКОВ О.Ю.	4	ХУДЯКОВ А.Ю.	4	TRISHKIN V.Ya.	90
ШАПКА І.В.	41	ШАПКА И.В.	41	US S.A.	73
ШВАЧИЧ Г.Г.	85	ШВАЧИЧ Г.Г.	85	VASHCHENKO S.V.	4
ШЕЙКУС А.Р.	90	ШЕЙКУС А.Р.	90	ZELENTSOV D.G.	14
ШУМЕЛЬЧИК Є.І.	25	ШУМЕЛЬЧИК Е.И.	25	ZHURAVLOVA O.I.	19