

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (СИБСТРИН)**

ТРУДЫ НГАСУ

Т. 21, № 1 (67)

НОВОСИБИРСК 2018



НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (СИБСТРИН)

Перечень услуг:

- проектирование и расчет: строительных конструкций, оснований и фундаментов, зданий и сооружений любой сложности и назначения, дополнительных этажей и новых объемов, инженерных сетей, предприятий водоподготовки, водоотведения, пневматических ручных и навесных машин ударного действия на любые параметры;
- комплексные натурные исследования оснований, фундаментов, надземных несущих и ограждающих конструкций, разработка рабочей документации по реконструкции и обеспечению дальнейшей надежной и безопасной эксплуатации зданий и сооружений;
- разработка градостроительной документации (генеральных планов, проектов планировки, проектов застройки), выполнение проектов интерьеров зданий, предметной среды, ландшафтного дизайна;
- геодезические работы – съемку подземных, наземных и надземных сооружений, создание специальных геодезических сетей на строительной площадке, геодезический контроль точности выполнения строительных работ, определение осадок и кренов зданий и сооружений;
- разработка мероприятий и технической документации по улучшению акустических характеристик концертных залов, студий, общественных и офисных помещений;
- проведение экспертизы проектной и проектно-сметной документации, качества выполнения строительных работ;
- выявление новых возможностей предприятия в условиях конкуренции, разработка деловых (хозяйственных), экологических паспортов предприятий, бизнес-планов инвестиционных проектов;
- обследование предприятий на соответствие международным стандартам ИСО серии 9000, осуществление подготовки организаций к сертификации; проведение социологических исследований;
- разработка программного обеспечения для решения инженерных задач;
- консультации по вопросам ценообразования и сметного дела, совершенствования управления предприятием, залогового и ипотечного кредитования;
- обучение по всем видам деятельности юрисдикции Госстроя.

**630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113,
Новосибирский государственный архитектурно-строительный
университет (Сибстрин)
E-mail: dao@sibstrin.ru, ntio@sibstrin.ru
Internet: nauka.sibstrin.ru/trudy/
Телефоны: (383) 266-28-39, 266-25-27
Факс: (383) 266-40-94**

ТРУДЫ НГАСУ. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2018. – Т. 21, № 1 (67). – 172 с.

Редакционная коллегия

Главный редактор – д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. РААСН Ю.Л. Сколубович

Заместитель главного редактора – д-р физ.-мат. наук, профессор В.Я. Рудяк

Заместители главного редактора по направлениям:

д-р техн. наук, профессор Л.В. Ильина,

д-р ист. наук, профессор Ю.И. Казанцев,

д-р техн. наук, профессор В.М. Митасов,

д-р физ.-мат. наук, профессор М.С. Соппа

Ученый секретарь: У.А. Апарина

Члены редколлегии:

д-р техн. наук, профессор В.В. Адищев,

д-р физ.-мат. наук, профессор С.М. Аульченко,

д-р физ.-мат. наук, профессор Ю.Е. Воскобойников,

д-р техн. наук, профессор Г.И. Гребенюк,

д-р техн. наук, профессор В.В. Дегтярёв,

д-р техн. наук, профессор В.Н. Зырянова,

д-р экон. наук, профессор Т.В. Федорович,

д-р техн. наук, профессор В.В. Молодин,

д-р физ.-мат. наук, профессор Ю.В. Немировский,

д-р ист. наук, доцент Л.К. Островский,

д-р ист. наук, профессор А.Г. Туманик

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА, МЕХАНИКА И МАТЕМАТИКА

Краснолуцкий С.Л., Лежнев Е.В., Рудяк В.Я.

Моделирование коэффициентов переноса
воды методом молекулярной динамики.....6

Мокрушников П.В. Методика и результаты измерения

микровязкости биомембран17

Рудяк В.Я., Минаков А.В., Пряжников М.И.

Особенности вязкости наножидкостей.
Экспериментальное изучение30

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

Гудков А.А. Крупнейший градостроитель Российской

империи первой трети XIX века

Василий Иванович Гесте (William Hastie)42

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ

Бабенкова В.А., Немчикова Л.А. Использование

углеволокна при усилении конструкций

зданий, эксплуатируемых

на подрабатываемых территориях48

Гербер Ю.А., Себешев В.Г. Надежность стержневых

систем с динамическим гашением

колебаний в областях сгущения

спектра собственных частот59

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Светышев Н.В., Герасимов В.В. Исследование организационной надежности системы объектов строительства | 75 |
| Унижонный П.А., Виноградов А.Б. Оценка альтернативных технологических методов строительства подземных сооружений | 82 |
| СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА | |
| Иванов Д.А., Молодин В.В. Миграция влаги при бетонировании конструкций на мерзлом бетонном основании | 90 |
| Титов М.М., Волков М.С. Повышение эффективности расчета процесса зимнего бетонирования по методу «термос» с использованием критериев подобия | 105 |
| СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ | |
| Ключкова Н.Ю., Абраменков Д.Э., Грузин А.В., Абраменков Э.А. Варианты средств перепуска воздуха в виде паза в пневмоударном механизме со ступенчатым ударником | 112 |
| Щепотин Г.К., Крутасов Б.В. Повышение несущей способности дорожных конструкций в условиях Сибири | 127 |

ПРИРОДООХРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Рафальская Т.А., Рагинская А.О.** Сравнительный анализ
центрального регулирования отпуска
теплоты в России и за рубежом 138

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

- Сафарян Г.Б., Герасимов В.В.** Надежность
программирования проектных
организационно-технологических
решений..... 155

ПЕДАГОГИКА, ПОДГОТОВКА КАДРОВ В ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ

- Иванова Г.П., Рудяк С.И.** Малый язык в России
(на примере вепсского языка) 162

ФИЗИКА, МЕХАНИКА И МАТЕМАТИКА

УДК 538.931

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА ВОДЫ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

С.Л. Краснолуцкий^{*}, Е.В. Лежнев^{}, В.Я. Рудяк^{***}**

Работа посвящена моделированию методом молекулярной динамики коэффициентов динамической вязкости и самодиффузии воды с помощью потенциала Леннард–Джонса. Выполнен подбор параметров потенциала, соответствующий экспериментальным значениям вязкости при заданной температуре 25 °C и атмосферном давлении. Изучена зависимость корреляционных функций и их интегралов для коэффициента вязкости от числа молекул. Сопоставление с экспериментальными данными показало, что точность порядка экспериментальной удается достичь лишь используя 64 000 молекул.

Ключевые слова: вода, молекулярная динамика, потенциалы взаимодействия, коэффициент вязкости, коэффициент самодиффузии.

Введение

Вода – краеугольный камень жизни на Земле. Античные и средневековые натурфилософы считали ее одним из четырех элементов наряду с землей, воздухом и огнем, конституирующих окружающий мир. С тех пор наука продвинулась далеко вперед. Выяснилось, что вода, несмотря на кажущуюся простоту ее химической формулы, является чрезвычайно сложным объектом. Ее свойства переноса до сих пор не удается убедительно моделировать методом молекулярной динамики (МД). Еще в 80-е годы XX в. для этого были разработаны специальные достаточно сложные межмолекулярные потенциалы [1]. Это мно-

^{*} Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры теоретической механики НГАСУ (Сибстрин)

^{**} Канд. техн. наук, доцент кафедры теоретической механики НГАСУ (Сибстрин)

^{***} Д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической механики НГАСУ (Сибстрин)

гопараметрические потенциалы (обычно 6 параметров), определить которые непросто. По этой причине все еще не удается достаточно хорошо моделировать, например, вязкость и теплопроводность воды в широком диапазоне температур и давлений [1, 2].

Довольно широко распространено мнение, что многие проблемы будут решены с помощью квантово-механического моделирования *ab initio* (из первых принципов) [3]. К сожалению, метод моделирования *ab initio* требует больших затрат вычислительных ресурсов, и это является его существенным недостатком. Затраты вырастут значительно больше, если дополнительно учитывать возбуждения атомов, процессы ионизации, неадиабатичность атомных ядер и др., не говоря уже о точном решении соответствующей квантово-механической задачи. Кроме того, встает проблема определения ряда используемых параметров.

Нашей целью является моделирование процессов переноса в наножидкостях на основе воды. В качестве первого этапа, естественно, необходимо убедительно и достаточно просто моделировать процессы переноса в воде. Ранее на основе потенциала Леннард–Джонса были построены потенциалы взаимодействия наночастица–молекула [4, 5] и наночастица–наночастица [6]. Поэтому естественно использовать потенциал Леннард–Джонса и для воды. Моделированию коэффициентов вязкости и самодиффузии воды и посвящена данная работа.

Методика моделирования

Для моделирования применялся стандартный метод молекулярной динамики (см., например, [7, 8]). Использовались оригинальный пакет SibMD, ранее применявшийся при решении различных задач теории переноса наножидкостей [9–12], и LAMMPS. Моделирование проводилось в кубической ячейке с периодическими граничными условиями. Взаимодействие молекул несущей среды между собой определялось потенциалом Леннард–Джонса

$$\Phi_{LJ}(r) = \begin{cases} 4\epsilon \left[\left(\sigma/r \right)^{12} - \left(\sigma/r \right)^6 \right], & r \leq R_c; \\ 0, & r > R_c, \end{cases} \quad (1)$$

где σ – эффективный диаметр молекулы среды; ε – глубина потенциальной ямы; $r = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$ – расстояние между молекулами i и j . Радиус обрезания потенциала $R_c = 2.5\sigma$.

В начальный момент времени молекулы среды равномерно размещались в ячейке моделирования в узлах простой кубической решетки в соответствии с требуемыми значениями числовой плотности молекул при заданной температуре. Начальные скорости молекул задавались в соответствии с распределением Максвелла при заданной температуре. Для интегрирования уравнений Ньютона применялась схема Верле. Использовались NVE и NVT термостаты.

Коэффициенты переноса рассчитывались на основе флуктуационно-диссипационной теоремы, связывающей коэффициенты вязкости и самодиффузии с корреляционными функциями соответствующих динамических переменных. В частности, коэффициент сдвиговой вязкости рассчитывался по формуле [7]

$$\eta = \frac{V}{3k_B T} \int_0^\tau \langle J_{xy}(t)J_{xy}(t+t_1) + J_{yz}(t)J_{yz}(t+t_1) + J_{zx}(t)J_{zx}(t+t_1) \rangle dt_1, \quad (2)$$

где xy – компонента тензора напряжений имеет вид:

$$J_{xy} = \frac{1}{V} \left[m \sum_{i=1}^N \dot{x}_i \dot{y}_i + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} F_{x,ij} y_{ij} \right].$$

Здесь m – масса молекулы; V – объем системы; T – температура среды; τ – время выхода на платовое значение [13]; F – сила, действующая на молекулу; x , y – координаты молекулы; N – число молекул. Угловые скобки в (2) означают усреднение по ансамблю.

В свою очередь коэффициент самодиффузии молекул определяется формулой

$$D = \frac{1}{3} \int_0^\tau \chi(t_1) dt_1, \quad (3)$$

где $\chi(t_1) = \langle \mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{v}(t + t_1) \rangle$ – автокорреляционная функция скорости (АКФС). Здесь \mathbf{v} – скорость молекулы.

Поскольку при молекулярно-динамическом расчете фазовых траекторий системы имеет место их локальная неустойчивость и перемешивание [8, 9, 14–16], то полученные данные необходимо усреднять по ансамблю независимо от построенных фазовых траекторий. В данной работе усреднение проводилось как минимум по 1000 независимым фазовым траекториям.

Сравнение пакетов SibMD и LAMMPS как инструментов моделирования вязкости флюида

На первом этапе было проведено тестирование использованного научного инструментария. Для этого с помощью пакетов SibMD и LAMMPS выполнялось моделирование коэффициентов вязкости аргона и воды. Рассматривался аргон плотностью $\rho = n\sigma^3 = 0.707$ при температуре 180 и 300 К. Использовались следующие параметры потенциала (1): $\sigma = 3.405 \text{ \AA}$, $\epsilon/k_B = 119.8 \text{ K}$ [17]. Ячейка моделирования содержала 4000 молекул. Расчет корреляционных функций проводился на времени $\tau = 10 \text{ пс}$. Результаты моделирования приведены в табл. 1.

Таблица 1
Результаты моделирования аргона при температуре 180 К

| | $T, \text{ K}$ | $P, \text{ бар}$ | $\eta, \text{ Па}\cdot\text{с}$ | $T, \text{ K}$ | $P, \text{ бар}$ | $\eta, \text{ Па}\cdot\text{с}$ |
|--------------|----------------|------------------|---------------------------------|----------------|------------------|---------------------------------|
| SibMD | 180.14 | 916.09 | $1.140 \cdot 10^{-4}$ | 299.79 | 2093 | $1.173 \cdot 10^{-4}$ |
| LAMMPS | 179.99 | 913.39 | $1.129 \cdot 10^{-4}$ | 299.99 | 2096 | $1.138 \cdot 10^{-4}$ |
| $\Delta, \%$ | 0.09 | 0.3 | 0.97 | 0.07 | 0.12 | 3.03 |

Одновременно проведено предварительное моделирование воды с параметрами потенциала (1) $\sigma = 2.95 \text{ \AA}$, $\epsilon/k_B = 500 \text{ K}$ и числовой плотностью $n_w = 0.03332925 \text{ \AA}^{-3}$ при температуре 25 °C [18]. Ячейка моделирования содержала 4000 молекул. Расчет корреляционных функций проводился на времени $\tau = 20 \text{ пс}$. Результаты моделирования приведены в табл. 2.

В табл. 1 и 2 в последней строке указана относительная погрешность полученных результатов моделирования.

Таблица 2
Результаты моделирования воды при температуре 25 °C

| | T , К | P , бар | η , Па·с |
|--------------|---------|-----------|-----------------------|
| SibMD | 298.74 | 2093.62 | $3.028 \cdot 10^{-4}$ |
| LAMMPS | 298.02 | 2096.16 | $2.947 \cdot 10^{-4}$ |
| Δ , % | 0.24 | 0.12 | 2.75 |

Сопоставление полученных данных показало, что SibMD и LAMMPS дают на выходе близкие значения вязкости и давления в широком диапазоне температур и параметров потенциала (1) взаимодействия молекул. Время расчета с помощью LAMMPS в 10 раз меньше, чем с помощью SibMD. Но SibMD обладает дополнительным функционалом, которого нет в стандартном пакете LAMMPS. В частности, SibMD позволяет отдельно считать различные вклады в коэффициент вязкости флюида.

Влияние числа молекул в элементарной ячейке на точность моделирования

Для моделирования вязкости воды сначала были определены по известным экспериментальным данным параметры потенциала (1): $\sigma = 2.958176964 \text{ \AA}$, $\varepsilon/k_B = 545.368 \text{ K}$ ($T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Затем была изучена точность моделирования коэффициента вязкости от числа молекул в ячейке. Использовался пакет LAMMPS. Проведены расчеты с числом молекул 4000, 8000, 16 000, 64 000. Расчет корреляционных функций проводился на времени $\tau = 20 \text{ ps}$. На рис. 1 в качестве примера приведена нормированная корреляционная функция для 64 000 молекул в ячейке моделирования.

Полученные корреляционные функции для коэффициента вязкости на временах до 5 пс практически одинаковы при всех числах использованных молекул. Однако на больших временах

они различаются достаточно сильно. При увеличении числа молекул в ячейке значительно уменьшаются случайные немонотонные составляющие этих функций (рис. 2).

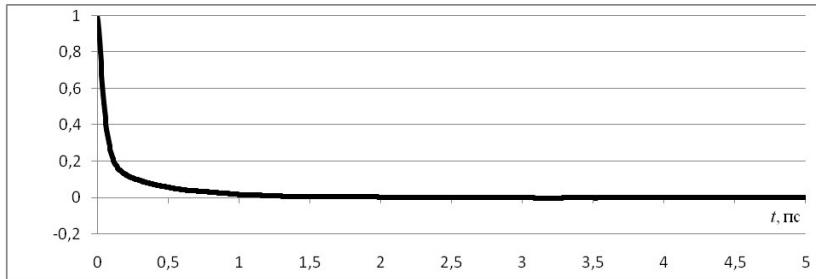


Рис. 1. Корреляционная функция для коэффициента вязкости на малых временах интегрирования

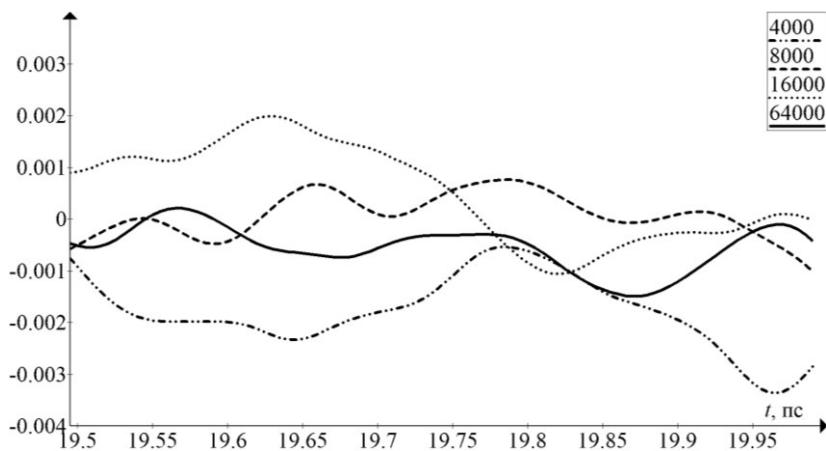


Рис. 2. Корреляционная функция для коэффициента вязкости на больших временах интегрирования

На платовое значение коэффициент вязкости (2) выходит за 3 пс. На рис. 3 в качестве примера приведена зависимость коэффициента вязкости от времени интегрирования для 64 000 молекул в ячейке моделирования.

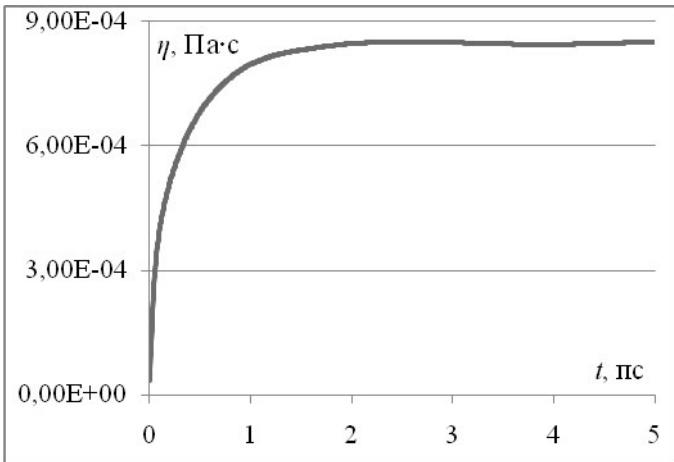


Рис. 3. Зависимость коэффициента вязкости от времени интегрирования

4. Сравнение с экспериментальными данными

В табл. 3 приведены результаты моделирования коэффициента вязкости воды η с помощью пакета LAMMPS при различном числе молекул N в ячейке моделирования, экспериментальные данные η_{exp} [20] и относительная погрешность моделирования Δ . Точность моделирования монотонно растет с увеличением числа частиц, причем $\Delta \sim 1/\sqrt{N}$. При этом давление воды равно 1.14 атм, среднеквадратичное отклонение – 36.6 атм.

Таблица 3
Результаты моделирования коэффициента вязкости воды
при температуре 25 °C

| N | 4000 | 8000 | 16 000 | 64 000 |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| η , Па·с | $8.17 \cdot 10^{-4}$ | $8.37 \cdot 10^{-4}$ | $8.46 \cdot 10^{-4}$ | $8.77 \cdot 10^{-4}$ |
| η_{exp} , Па·с | $8.902 \cdot 10^{-4}$ | $8.902 \cdot 10^{-4}$ | $8.902 \cdot 10^{-4}$ | $8.902 \cdot 10^{-4}$ |
| Δ , % | 8.47 | 6.02 | 4.95 | 1.5 |

С помощью пакета SibMD были рассчитаны кинетический η_k , столкновительный η_c и перекрестный столкновительно-кинетический η_{ck} вклады в коэффициент вязкости воды. Было установлено, что столкновительный вклад в коэффициент вязкости составляет 98.4 %.

5. Моделирование коэффициента самодиффузии воды

На рис. 4 представлено типичное поведение АКФС молекул воды, нормированной на начальное значение. На начальном участке (до 5 пс) АКФС затухает экспоненциально. После 50 пс уже виден степенной хвост. При этом АКФС убывает пропорционально $t^{-3/2}$.

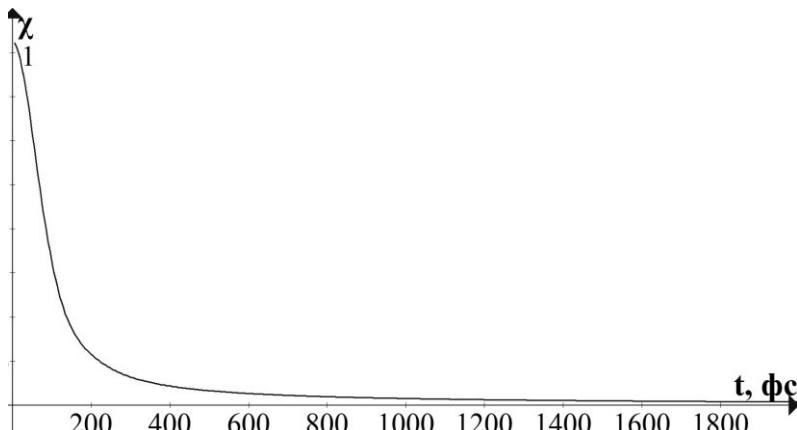


Рис. 4. Эволюция автокорреляционной функции скорости

На рис. 5 показана зависимость коэффициента самодиффузии (3) от времени интегрирования. Выход на платовое значение достигается достаточно медленно из-за степенной зависимости АКФС $\chi(t)$ от времени. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных [20] показало, что коэффициент самодиффузии молекул воды при температуре 298.2 К и атмосферном давлении моделируется при использовании 64 000 молекул с точностью около 4 %.

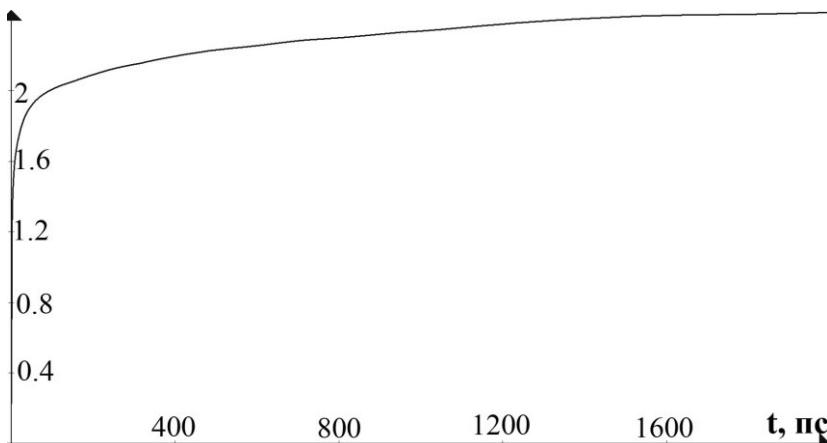


Рис. 5. Зависимость коэффициента самодиффузии молекул воды от времени интегрирования

Полученный вывод достаточно прост. Процессы переноса в воде вполне могут моделироваться с помощью потенциала Леннард–Джонса.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 17-01-000040 и № 17-58-45023).

Список литературы

1. *Jorgensen, W. L. Comparison of simple potential functions for simulating liquid water / W. L. Jorgensen, J. Chandrasekhar, J. D. Madura // J. Chem. Physics. – 1983. – Vol. 79. – P. 926–935.*
2. *Diffusion coefficient and shear viscosity of rigid water models / S. Tazi, A. Boțan, M. Salanne, V. Marry, P. Turq, B. Rotenberg // J. Physics: Condensed Matter. – 2012. – Vol. 24. – 284117.*
3. *Ab initio molecular dynamics simulation of liquid water by quantum Monte Carlo / A. Zen, Y. Luo, G. Mazzola, L. Guidoni, S. Sorella // J. Chem. Physics. – 2015. – Vol. 142. – 144111.*

4. *Rudyak, V. Ya.* The interaction potential of dispersed particles with carrier gas molecules / V. Ya. Rudyak, S. L. Krasnolutskii // Rarefied Gas Dynamics XXI. – Marseille, 1998. – Vol. 1. – P. 263–270.
5. Рудяк, В. Я. Диффузия наночастиц в разреженном газе / В. Я. Рудяк, С. Л. Краснолуцкий // ЖТФ. – 2002. – Т. 72, № 7. – С. 13–20.
6. Рудяк, В. Я. О потенциале взаимодействия наночастиц / В. Я. Рудяк, С. Л. Краснолуцкий, Д. А. Иванов // Доклады Академии наук. – 2012. – Т. 442, № 1. – С. 54–56.
7. Рудяк, В. Я. Статистическая аэрогидромеханика. Т. 2. Гидромеханика / В. Я. Рудяк. – Новосибирск : НГАСУ, 2005. – 320 с.
8. Норман, Г. Э. Метод классической молекулярной динамики: замысел и реальность / Г. Э. Норман, В. В. Стегайлов // Наноструктуры. Математическая физика и моделирование. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 31–59.
9. *Rudyak, V. Ya.* Molecular dynamics simulation of nanoparticle diffusion in dense fluids / V. Ya. Rudyak, S. L. Krasnolutskii, D. A. Ivanov // Microfluidics and Nanofluidics. – 2011. – Vol. 11, No. 4. – P. 501–506.
10. *Rudyak, V. Ya.* Dependence of the viscosity of nanofluids on nanoparticle size and material / V. Ya. Rudyak, S. L. Krasnolutskii // Physics Letters A. – 2014. – Vol. 378. – P. 1845–1849.
11. Рудяк, В. Я. Моделирование коэффициента вязкости наножидкости методом молекулярной динамики / В. Я. Рудяк, С. Л. Краснолуцкий // ЖТФ. – 2015. – Т. 85, вып. 6. – С. 9–16.
12. Рудяк, В. Я. Моделирование коэффициента теплопроводности наножидкости с малыми частицами методом молекулярной динамики / В. Я. Рудяк, С. Л. Краснолуцкий // ЖТФ. – Т. 87, вып. 10. – С. 1450–1458.
13. Моделирование процессов переноса методом молекулярной динамики. Коэффициент самодиффузии / В. Я. Рудяк, А. А. Белкин, Д. А. Иванов, В. В. Егоров // Теплофизика высоких температур. – 2008. – Т. 46, № 1. – С. 35–45.

14. Рудяк, В. Я. Компьютерное моделирование конечного числа взаимодействующих частиц / В. Я. Рудяк, Д. А. Иванов // Доклады АН ВШ РФ. – 2003. – № 1. – С. 30–38.
15. Рудяк, В. Я. Динамические и стохастические свойства открытой системы конечного числа упруго взаимодействующих частиц / В. Я. Рудяк, Д. А. Иванов // Труды НГАСУ. – 2004. – Т. 7, № 3 (30). – С. 47–58.
16. Норман, Г. Э. Стохастическая теория метода классической молекулярной динамики. / Г. Э. Норман, В. В. Стегайлов // Математическое моделирование. – 2012. – Т. 24, № 6. – С. 3–44.
17. Гиршфельдер, Д. Молекулярная теория газов и жидкостей / Д. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд. – Москва : Изд-во иностранной литературы, 1961. – 929 с.
18. Recommended table for the density of water between 0 C and 40 C based on recent experimental reports / M. Tanaka, G. Girard, R. Davis, A. Peuto, N. Bignell // Metrologia. – 2001. – Vol. 38. – P. 301–309.
19. CRC Handbook of Chemistry and Physics / ed. D. R. Lide. – 90th edition. – CRC, 2010. – P. 2760.
20. Krynicki, K. Pressure and temperature dependence of self-diffusion in water / K. Krynicki, C. D. Green, D. W. Sawyer // Faraday Discussions of the Chemical Society. – 1978. – Vol. 66. – P. 199–208.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОВЯЗКОСТИ БИОМЕМБРАН

П.В. Мокрушников*

Одной из характеристик структуры биомембран является их микровязкость. Она соответствует вязкости однородной среды, в которой зонд двигался бы с той же скоростью, с которой он движется в реальной мембране. Рассмотрены методы измерения микровязкости биомембран, примеры того, как изменение микровязкости мембран может являться маркером метаболического состояния клеток.

Ключевые слова: липидный бислой, микровязкость биомембран.

Введение

Живая клетка любого организма – сложная иерархическая система, в ее структурно-функциональной организации важную роль играют биологические мембранны. Именно мембранны разделяют клетку на функциональные отсеки и одновременно определяют интегральный характер поведения ее как целого. Для нас большой интерес представляет мембрана эритроцита, являющаяся универсальной моделью для изучения белок-липидных взаимодействий в биомембранах.

Эритроцит – это специализированная клетка, которая переносит кислород O_2 от легких к тканям с помощью гемоглобина Hb. В капиллярах оксигемоглобин HbO_2 распадается и O_2 диффундирует к клеткам органов и тканей. Первым препятствием на пути такой диффузии служит мембрана эритроцита. От изменений свойств мембранны эритроцита зависит скорость диффузии через нее кислорода, активность мембранных белков, реологические свойства эритроцита.

Измерение микровязкости мембран эритроцитов

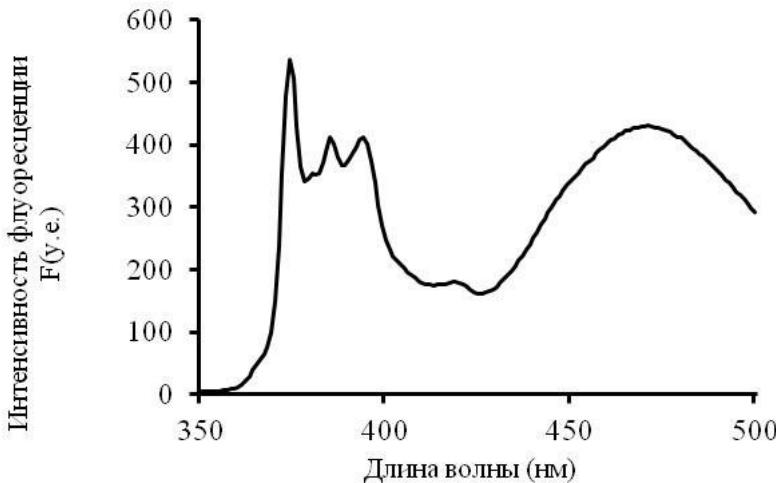
Несколько слов о понятии «микровязкость». Понятие «вязкость» не вполне точно, когда речь идет о подвижности флуо-

* Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики НГАСУ (Сибстрин)

ресцентного зонда в такой асимметричной, сложной по химической организации системе, как биологические мембранны. Скорость поступательной диффузии зонда определяется микроструктурой его непосредственного окружения, поэтому и пользуются термином «микровязкость». Практически под этим понимается некоторый эквивалент: он соответствует вязкости однородной среды, в которой зонд двигался бы с той же скоростью, с которой он движется в реальной мембране [1]. Другими словами, микровязкость показывает, с каким сопротивлением встречается зонд при движении внутри мембранны. Отсюда понятно, что в зависимости от метода измерения подвижности, характера зонда и глубины его локализации в мембране значения микровязкости могут варьироваться. Тем не менее данный параметр является важнейшим для идентификации структурных изменений в биомембране.

Микровязкость мембран измеряют флуоресцентным методом с помощью зонда пирен. Концентрация димеров пирена пропорциональна частоте встреч одиночных молекул пирена. Частота встреч зависит от микровязкости мембранны. Чем выше микровязкость мембранны, тем меньше вероятность встреч и образования димеров, тем меньше их концентрация во взвеси. Интенсивность флуоресценции молекул зависит от их концентрации. По отношению интенсивности свечения димеров пирена при $\lambda = 468$ нм к интенсивности свечения мономеров при $\lambda = 393$ нм можно судить о концентрации димеров. Чем выше концентрация димеров, тем ниже микровязкость мембран [1].

Для измерения микровязкости липидного бислоя вблизи мембранных белков (область белок-липидного взаимодействия) используется длина волны возбуждения $\lambda = 281$ нм. Микровязкость липидного бислоя вдали от мембранных белков (область липид-липидного взаимодействия) используется длина волны возбуждения $\lambda = 337$ нм. Максимумы излучения наблюдались при $\lambda = 374$ нм и $\lambda = 393$ нм (вибронные пики излучения мономеров пирена), и $\lambda = 468$ нм (максимум излучения димеров пирена, см. рисунок).



Спектр эмиссии пирена во взвеси теней эритроцитов.

Длина волны возбуждения $\lambda = 337$ нм. Максимумы интенсивности наблюдались при $\lambda = 374$ нм, $\lambda = 385$ нм и $\lambda = 393$ нм (пики эмиссии мономеров пирена), $\lambda = 468$ нм (пик эмиссии димеров пирена)

Относительная микровязкость мембран описывалась отношением $L = \frac{\eta(A)}{\eta(0)}$, где $\eta(A)$ и $\eta(0)$ – микровязкость мембран при добавлении во взвесь гормонов концентрации A и без добавления гормона соответственно. Для области липид-липидного взаимодействия относительная микровязкость L вычислялась по формуле

$$L = \frac{\eta(A)}{\eta(0)} = \frac{F_{468}(0)}{F_{468}(A)} \cdot \frac{F_{393}(A)}{F_{393}(0)},$$

где $F_{468}(A)$ – интенсивность флуоресценции пирена при $\lambda = 468$ нм при концентрации A гормона во взвеси; $F_{468}(0)$ – интенсивность флуоресценции пирена при $\lambda = 468$ нм при отсутствии гормона во взвеси. $F_{393}(A)$ и $F_{393}(0)$ – интенсивность флуоресценции пирена при $\lambda = 393$ нм при кон-

центрации A гормона во взвеси и при отсутствии гормона во взвеси соответственно.

Для области белок-липидного взаимодействия относительная микровязкость L вычислялась по формуле

$$L = \frac{\eta(A)}{\eta(0)} = \frac{F_{468}(0) - I_{468}}{F_{468}(A) - I_{468}} \cdot \frac{F_{393}(A) - I_{393}}{F_{393}(0) - I_{393}},$$

где I_{393} и I_{468} – интенсивность флуоресценции триптофановых остатков в мембранных белках при $\lambda = 393$ нм и $\lambda = 468$ нм соответственно.

Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) широко используется в исследованиях физико-химических и биологических явлений. Для измерения микровязкости мембран используют метки с нитроксильными радикалами. Спектр ЭПР нитроксильных радикалов обычно состоит из трех линий равной интенсивности, благодаря взаимодействию неспаренного электрона с ядром атома азота. Если нитроксильный радикал находится в водном растворе, то его вращение является изотропным и достаточно быстрым, при этом наблюдается сигнал ЭПР, состоящий из трех узких симметричных линий. При уменьшении скорости вращения наблюдается уширение линий и изменение амплитуды компонент спектра. Дальнейшее увеличение вязкости среды приводит к еще большему изменению сигнала ЭПР спинового зонда. Для количественного описания вращательного движения радикала используют понятие времени вращательной корреляции τ_c . Оно равно времени поворота нитроксильного радикала на угол $\pi/2$. На основании анализа сигнала ЭПР время корреляции можно оценить, используя эмпирическое уравнение [2].

Синтез стабильных нитроксильных радикалов был важным этапом в использовании метода ЭПР для изучения внутренней вязкости биологических мембран и белков. Однако они имеют один существенный недостаток – вследствие их амфи菲尔ности трудно бывает определить локализацию этого зонда и таким образом ответить на вопрос: где мы, собственно говоря, определя-

ем микровязкость. Эта проблема была практически решена, когда появились так называемые жирнокислотные спиновые зонды, т.е. соединения, в которых молекула нитроксильного радикала была ковалентно присоединена к молекуле жирной кислоты. В этом случае спектр ЭПР несомненно отражает свойства именно гидрофобной (липидной) фазы изучаемой системы, куда встраивается зонд [3].

Недостатком обоих методов является разрушение биомембранны зондами. Молекулы-зонды разрыхляют липидный бислой, нарушая липид-липидные и белок-липидные взаимодействия в мембране. Это может приводить к большим погрешностям при измерении микровязкости.

Микровязкость мембран как маркер метаболического и патологического состояния клеток

Изменение микровязкости мембран может являться маркером метаболического состояния клеток. С возрастом микровязкость мембран человека увеличивается, что связано с избытком холестерина, накоплением продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ), изменением состава фосфолипидного бислоя. При этом биомембранны становятся жесткими, пористыми, изменяется форма клетки (высота клетки увеличивается) [4]. Состояние мембран эритроцитов меняется при изменении липидного состава крови [5], при сахарном диабете 1 и 2 типов [6]. Эти изменения выражаются в снижении текучести (увеличение микровязкости) мембран, которые связывают с гликозилированием белков мембранны, а также с влиянием инсулина, который участвует в подавлении ПОЛ и способствует увеличению внутриклеточного уровня кальция [7]. Повышение микровязкости липидного бислоя мембран эритроцитов наблюдали при раке легкого [8], желудка и кишечника, снижение – при злокачественной лимфоме [9]. Микровязкость мембран эритроцитов у больных раком молочной железы по мере снижения гормонозависимости опухоли повышалась [10]. Уменьшение текучести плазматических мембран наблюдали у больных ишемической болезнью сердца [7], что связано с увеличением концентрации

в плазме крови 8-изо-простагландина F₂α и уменьшением концентрации метаболитов оксида азота. Полагают, что это может быть приспособительным механизмом мембран [11].

Основной механизм тяжелой депрессии состоит в нарушении норадренергической, серотонинергической и дофаминергической систем. Они могут влиять на структуру и метаболизм липидов. У больных тяжелой депрессией было обнаружено снижение уровня омега-3 жирных кислот, увеличение соотношения омега-6/омега 3 жирных кислот в сыворотке крови и в мембранах эритроцитов. Омега-3 жирные кислоты участвуют в изменении микровязкости (текучести) мембран, которая влияет на передачу нейротрансмиттерами электрического импульса от нервной клетки через синаптическое пространство между нейронами и от нейронов к мышечной ткани. Кроме того, активация воспалительной реакции была обнаружена у депрессивных больных за счет увеличения производства провоспалительных цитокинов (IL-1b, IL-6, интерферон-гамма, TNF-альфа) и эйказаноидов (простагландина E2) в крови и цереброспинальной жидкости. Это приводит к увеличению перекисного окисления липидов и деградации полиненасыщенных жирных кислот, которые могут привести к увеличению окислительного стресса и микровязкости мембран [12].

Проводились исследования влияния облучения очень низкой дозой быстрых нейтронов на клеточную мембрану и вторичную структуру белка эритроцитов крыс. Обнаружено увеличение полярности мембранны, длины цепи фосфолипидов, их упаковки и ненасыщенности. Это может быть из-за перекисного окисления мембранных липидов. Наблюдаемый сдвиг CH₂ полосы валентных колебаний в сторону более низких частот может быть связан с уменьшением текучести мембран. Зафиксировано увеличение доли α-спиралей и уменьшение доли β-структур второй структуры мембранных белка [13].

Обнаружено большое (до 40 %) увеличение микровязкости мембран в белок-липидной области взаимодействия у больных с синдромом мягкого когнитивного снижения (начальной стадии болезни Альцгеймера) по сравнению со здоровыми людьми

[14, 15]. Это связывают с увеличением концентрации тестостерона в крови на начальной стадии болезни Альцгеймера [16]. Существуют данные, свидетельствующие о нейропротекторном эффекте тестостерона при этой болезни [16].

Заболевание почек, приводящее к снижению скорости клубочковой фильтрации (СКФ), увеличивает микровязкость мембран эритроцитов, что в свою очередь обостряет сердечно-сосудистые заболевания.

При остром или хроническом отравлении свинцом микровязкость мембран эритроцитов при концентрации Pb^{2+} от 100 до 700 μM увеличивалась, а при дальнейшем увеличении концентрации Pb^{2+} – уменьшалась [17].

Методами флуоресцентного анализа исследовалось влияние синтетических производных витамина Е тиофана и тиофана-М на реологические свойства мембран эритроцитов. Первый препарат снижал микровязкость как в области липид-липидных, так и белок-липидных взаимодействий. Второй препарат снижал микровязкость в области белок-липидных взаимодействий и повышал в области липид-липидных взаимодействий. Проверка эффективности антиоксидантной защиты эритроцитарных мембран показала, что тиофан значительно подавляет перекисное окисление липидов мембран и образование белково-липидных сшивок, восстанавливая реологические свойства эритроцитов [18].

Влияние гормонов и наночастиц на микровязкость биомембран

Сегодня широко распространен среди врачей диагноз «коронарный синдром X». Клинически он проявляется стенокардией напряжения, на электрокардиограмме появляется депрессия сегмента ST ишемического типа без ангиографических признаков сужения коронарных артерий и при нормальной функции левого желудочка. Острая ишемия миокарда и коронарная недостаточность часто наблюдаются у молодых людей. Известно много непонятных случаев скоропостижной смерти молодых спортсменов во время соревнований. У них нет бляшек в коро-

нарных сосудах, но почему-то тоже развивается острая коронарная недостаточность. Вероятной причиной этого может быть стресс и прием стероидных гормонов, без которых, по мнению многих спортсменов, невозможно нарастить мышечную массу. Во время стресса в крови значительно повышается содержание кортизола и особенно адреналина. Они вместе со стероидными гормонами создают высокий уровень гормонов в крови.

При взаимодействии гормонов и клеток запускается каскад биохимических реакций. Кроме этого, гормоны стресса (например, кортизол, адреналин, норадреналин) и андрогены (такие как андростерон, тестостерон, ДЭА, ДЭАС) могут связываться с плазматическими мембранами, изменяя их структуру, увеличивая микровязкость мембран и тем самым влиять на функции мембранных клетки (негеномный эффект) [19–21]. На структуру мембран влияют и белки крови (например, аполипопротеин А-1) [22]. Изменение структуры мембран влияет на прохождение эритроцитов по микрокапиллярам, на активность Na^+,K^+ -АТФаз мембран эритроцитов [23–25]. Экспериментально показано, что длительное воздействие гормона стресса адреналина может привести к слэджированию эритроцитов и закупорке микрососудов сердца (стазу) [26]. Механизм структурных переходов, распределение механических напряжений в биомембранах еще предстоит выяснить [27–28].

Измерение микровязкости мембран при совместном воздействии на нее адреналина и кортизола показало эффект вытеснения кортизолом адреналина от мест связывания на плазматической мемbrane [29].

В эпоху нанотехнологической революции создаются все новые наночастицы, причем минимальный технологический предел уже достиг 1 нм (например, фуллерены). На данный момент объемы производства различных наночастиц превышают сотни тысяч тонн в год. Они широко используются для наноструктурирования поверхностей машин и механизмов, в косметике (входят в состав кремов, скрабов). Однако их воздействие на организм человека изучено слабо. Проникая внутрь организма, нанокристаллы адсорбируются на поверхности клеток. Если

размер наночастиц меньше критического, они могут проникать в мембрану, разрушая ее. Это превращает некоторые новомодные косметические средства в опасные для здоровья вещества. Например, добавка в скрабы нанокристаллов оксида титана с размерами меньше критического может приводить к лизису здоровых клеток эпидермиса [30–31].

Выводы

Методы измерения микровязкости биомембран широко применяются в медико-биологических исследованиях. Несмотря на свои недостатки, они могут дать очень ценную информацию о структурном состоянии мембран, структурных переходах в мембранах при воздействии на них различных экзогенных и эндогенных факторов. Помимо фундаментальных исследований, эти методы в будущем могут применяться и для диагностики различных патологий.

Список литературы

1. Добрецов, Г. Е. Флуоресцентные зонды в исследовании клеток, мембран и липопротеинов / Г. Е. Добрецов. – Москва : Наука, 1989. – 263 с.
2. Кузнецов, А. Н. Метод спинового зонда / А. Н. Кузнецов. – Москва : Наука, 1976. – 347 с.
3. Современные методы биофизических исследований : практикум по биофизике / под ред. А. Б. Рубина. – Москва : Высшая школа, 1988. – 159 с.
4. Ишутина, Н. А. Перекисное окисление липидов и микровязкость мембран эритроцитов у женщин с обострением герпес-вирусной инфекции / Н. А. Ишутина // Дальневосточный медицинский журнал. – 2012. – № 34 (1). – С. 59–61.
5. Tsuda, K. Insulin and membrane microviscosity of erythrocytes as risk factors for stroke / K. Tsuda // Stroke. – 2003. – Vol. 34 (3). – P. 154–159.

6. *Decreased fluidity of isolated erythrocytemembranes in type 1 and type 2 diabetes. The effect of resorcylidene amino-guanidine / I. Waczulikova [et al.] // Gen. Physiol. Biophys.* – 2000. – Vol. 19 (4). – P. 381–392.
7. *Tsuda, K. Chronic kidney disease predicts impaired membrane microviscosity of red blood cells in hypertensive and normotensive subjects / K. Tsuda // Int. Heart J.* – 2013. – Vol. 54 (3). – P. 154–159.
8. *Структура и свойства липидного бислоя мембран эритроцитов у больных со злокачественными новообразованиями / Е. А. Степовая [и др.] // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины.* – 2003. – № 136 (11). – С. 553–557.
9. *Изменение микровязкости мембран лимфоцитов и эритроцитов крови у онкологических больных / И. А. Горошинская [и др.] // Вопросы медицинской химии.* – 1999. – № 45 (1). – С. 53–57.
10. *Микровязкость мембран эритроцитов у больных раком молочной железы: связь с рецепторным фенотипом опухоли / Е. В. Цырлина, О. Г. Крюкова, Т. Е. Порошина, Е. А. Туркевич, Н. Ю. Бараш, З. И. Муллахметова, В. Ф. Семиглазов, Л. М. Берштейн // Вопросы онкологии.* – 2014. – № 60 (4). – С. 504–509.
11. *Микровязкость мембран эритроцитов при хронической коронарной недостаточности у лиц средней и старшей возрастных групп / Т. Ю. Реброва, С. А. Афанасьев, О. Д. Путрова, А. Н. Репин // Успехи геронтологии.* – 2014. – № 27 (3). – С. 457 – 462.
12. *Trebaticka, J. Psychiatric disorders and omega-3 fatty acids / J. Trebaticka, Z. Durackova // Free Radic. Biol. Med.* – 2014. – Vol. 75. – Suppl. 1. – P. 52–57.
13. *Effects of Very Low Dose Fast Neutrons on Cell Membrane And Secondary Protein Structure in Rat Erythrocytes / A. Saeed, G. A. Raouf, S. S. Nafee, S. A. Shaheen, Y. Al-Hadeethi // PLoS One.* – 2015. – Vol. 10 (10). – e0139854.

14. Показатели структуры мембраны и активность ацетилхолинэстеразы эритроцитов у пациентов с синдромом мягкого когнитивного снижения / Л. Д. Фаткуллина, Е. М. Молочкина, О. М. Зорина, Д. Е. Подчуфарова, С. И. Гаврилова, Я. Б. Федорова, Т. П. Клюшник, Е. Б. Бурлакова // Журнал неврологии и психиатрии. – 2013. – № 113 (6). – С. 62–67.
15. Герасимов, Н. Ю. Исследование ЭПР-методом спиновых зондов изменений текучести мембран органелл мозга мышей с экспериментальной патологией, моделирующей болезнь Альцгеймера / Н. Ю. Герасимов, А. Н. Голощапов, Е. Б. Бурлакова // Биофизика. – 2013. – № 58 (2). – С. 252–256.
16. Нейропротекторное действие гексапептида HLDF-6 на нейроны гиппокампа крыс на модели болезни Альцгеймера in vivo и in vitro / И. А. Костянин, С. С. Жохов, З. И. Сторожева, А. Т. Прошин, Е. А. Сурина, И. И. Бабиченко, В. В. Шерстнев, В. М. Липкин // Биоорганическая химия. – 2006. – Т. 32, № 4. – С. 399–407.
17. Effects of chronic and acute lead treatments on the biophysical properties of erythrocyte membranes, and a comparison with model membranes / H. Ahyayauch, W. Sansar, A. Rendón-Ramírez, F. M. Goñi, M. Bennouna, H. Gamrani // FEBS Open Bio. – 2013. – Vol. 15 (3). – P. 212–217.
18. Панин, Л. Е. Взаимодействие синтетических производных витамина Е на реологические свойства эритроцитарных мембран / Л. Е. Панин, П. В. Мокрушников // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. – 2013. – № 5 (15). – С. 101–110.
19. The interaction mechanism of cortisol and catecholamines with structural components of erythrocyte membranes / L. E. Panin, P. V. Mokrushnikov, V. G. Kunitsyn, B. N. Zaitsev // Journal of physical chemistry B. – 2010. – Vol. 114. – P. 9462–9473.
20. Fundamentals of multilevel mesomechanics of nanostructural transitions in erythrocyte membranes and their destructions in interaction with stress hormones / L. E. Panin, P. V. Mokrushnikov, V. G. Kunitsyn, V. E. Panin, B. N. Zaitsev // Physical Mesomechanics. – 2011. – Vol. 14, No. 3–4. – P. 167–177.

21. *Interaction mechanism of anabolic steroid hormones with structural components of erythrocyte membranes* / L. E. Panin, P. V. Mokrushnikov, V. G. Kunitsyn, B. N. Zaitsev // Journal of physical chemistry B. – 2011. – Vol. 115. – P. 14969–14979.
22. Влияние нативного и окислительно модифицированного аполипопротеина А-I на микровязкость липидного бислоя плазматической мембраны эритроцитов / П. В. Мокрушников, А. Н. Дударев, Т. А. Ткаченко, А. Ю. Городецкая, И. Ф. Усынин // Биологические мембранны. – 2016. – Т. 33, № 6. – С. 406–411.
23. Мокрушников, П. В. Влияние pH на поверхностное натяжение взвеси эритроцитов / П. В. Мокрушников // Бюллетень Сибирского отделения Российской Академии медицинских наук. – 2010. – № 1 (147). – С. 38–46.
24. Куницын, В. Г. Механизм микроциркуляции эритроцита в капиллярном русле при физиологическом сдвиге pH / В. Г. Куницын, П. В. Мокрушников, Л. Е. Панин // Бюллетень Сибирского отделения Российской Академии медицинских наук. – 2007. – Т. 5. – С. 28–32.
25. Панин, Л. Е. Воздействие андрогенов на активность Na^+, K^+ -АТФазы эритроцитарных мембран / Л. Е. Панин, П. В. Мокрушников // Биофизика. – 2014. – Т. 59, вып. 1. – С. 127–133.
26. Гормоны стресса и коронарный синдром Х (экспериментальные исследования) / Л. Е. Панин, П. В. Мокрушников, Р. А. Князев, А. Р. Колпаков, Б. Н. Зайцев // Атеросклероз. – 2012. – Т. 6. – С. 12–34.
27. Мокрушников, П. В. Механические напряжения в мембранах эритроцитов (теоретическая модель) / П. В. Мокрушников // Биофизика. – 2017. – Т. 62, № 2. – С. 330–335.
28. Основы многоуровневой мезомеханикиnanoструктурных переходов в мембранах эритроцитов и их разрушения при взаимодействии с гормонами стресса / Л. Е. Панин, П. В. Мокрушников, В. Г. Куницин, В. Е. Панин, Б. Н. Зайцев // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 5–17.

29. *Mokrushnikov, P. V. The action of stress hormones on the structure and function of erythrocyte membrane / P. V. Mokrushnikov, L. E. Panin, B. N. Zaitsev // Gen. Physiol. Biophys. – 2015. – Vol. 34, No. 3. – P. 311–321.*
30. *Взаимодействие нанокристаллов корунда и кварца с мембранными эритроцитами / П. В. Мокрушников, Л. Е. Панин, Б. Н. Зайцев, Н. С. Доронин, А. И. Козельская, А. В. Панин // Биофизика. – 2011. – Т. 56, вып. 6. – С. 1105–1110.*
31. *Morphological changes of the red blood cells treated with metal oxide nanoparticles / A. I. Kozelskaya, A. V. Panin, I. A. Khlussov, P. V. Mokrushnikov, B. N. Zaitsev, D. I. Kuzmenko, G. Yu. Vasyukov // Toxicology in Vitro. – 2016. – Vol. 37. – P. 34–40.*

ОСОБЕННОСТИ ВЯЗКОСТИ НАНОЖИДКОСТЕЙ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ

В.Я. Рудяк^{*}, А.В. Минаков^{}, М.И. Пряжников^{***}**

Статья посвящена экспериментальному изучению вязкости наножидкостей. Рассмотрены наножидкости на основе воды и этиленгликоля с различными оксидными частицами. Показано, что вязкость наножидкостей существенно выше вязкости обычных крупнодисперсных жидкостей. Кроме того, она зависит не только от концентрации наночастиц, но также от их размера и материала, причем вязкость тем выше, чем меньше размер частиц. В ряде случаев наножидкости с базовым ньютоновским флюидом могут иметь неニュтоновскую реологию. Возможность смены реологии растет с увеличение концентрации наночастиц и уменьшением их размера. Неньютоновские наножидкости оказываются псевдопластическими или вязкопластическими.

Ключевые слова: наножидкость, наночастицы, вязкость, реология.

Введение

Наножидкости являются сравнительно новым типом двухфазной среды, состоящей из несущего флюида и наночастиц, т.е. частиц с характерными размерами от 1 до 100 нм. Строгое ограничение размеров наночастиц сверху является важной особенностью наножидкостей, что отличает их от давно изучавшихся в химии коллоидных растворов. Исследование физики наножидкостей началось сравнительно недавно и было инициировано различными их приложениями [1–4]. Приоритетом здесь оказались теплофизические свойства наножидкостей. Так как обычно в приложениях имеют место течения наножидкостей, то определяющую роль играет их вязкость. Она экспериментально интенсивно изучается. Только за последние десять лет появилось несколько сотен статей (по данным Web of Science). Тем не

^{*} Д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической механики НГАСУ (Сибстрин)

^{**} Канд. техн. наук, доцент ИСИ СФУ, Красноярск

^{***} Науч. сотрудник ИСИ СФУ, Красноярск

менее, несмотря на довольно значительный накопленный экспериментальный материал все еще продолжаются дискуссии [5–8]. Причин этому несколько. Долгое время многим исследователям казалось, что вязкость наножидкостей должна зависеть лишь от концентрации частиц. С другой стороны, сегодня все еще идут дискуссии относительно того, зависит ли вязкость наножидкостей от размера частиц и, если зависит, то как [8]. Наконец выяснилось, что наножидкости могут иметь неньютоновскую реологию. Таким образом, необходимо систематическое экспериментальное изучение вязкости и реологии наножидкостей, которое позволило бы снять имеющиеся противоречия. Такое исследование проводилось нами на протяжении последних нескольких лет. Представление полученных результатов и является предметом настоящей статьи.

Зависимость вязкости от концентрации частиц и их размера

Всего было изучено несколько десятков наножидкостей на основе воды и этиленгликоля с частицами SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , CuO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 . Объемная концентрация частиц менялась от 0.25 до 8 %. Размер частиц варьировался от 10 до 150 нм. Наночастицы были приобретены у компании ОАО «Плазмотрен», Москва.

Все исследуемые в данной работе наножидкости приготавливались стандартным двухшаговым методом [3, 4]. Наночастицы заданного среднего размера в необходимом количестве добавлялись в базовую жидкость, затем механически перемешивались. Далее полученные суспензии подвергались ультразвуковой обработке. Время обработки определялось так, чтобы измеряемая вязкость не менялась при его увеличении. Обычно при использовании ультразвуковой ванны «Сапфир ТЦ-10338» время составляло 45 мин.

Измерение коэффициента вязкости наножидкостей проводилось с помощью ротационного вискозиметра Брукфильда DV2T со сменными шпинделями. Использовался также ротаци-

онный вискозиметр OFITE-900. Во всех случаях точность измерения вязкости составляет 1–2 %. В процессе измерения скорость сдвига γ последовательно увеличивалась до значений 10^{-3} с^{-1} . Это позволило изучить характер зависимости тензора сдвиговых напряжений исследуемой жидкости от скорости сдвига и определить ее реологию. Измерения проводились при фиксированной температуре. Все измерения, представленные ниже, выполнены при температуре 25 °C.

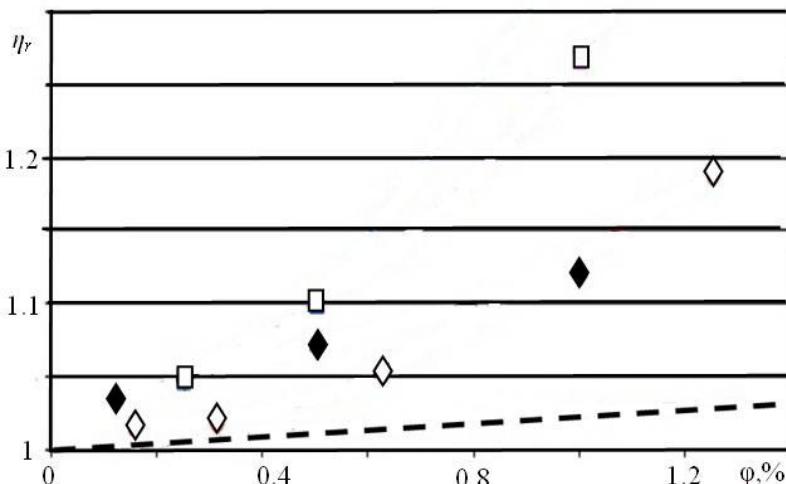


Рис. 1. Зависимость коэффициента относительной вязкости наножидкостей на основе этиленгликоля при малых объемных концентрациях частиц

Первая задача при измерении вязкости наножидкостей – это определение ее зависимости от концентрации частиц. Было установлено, что во всех случаях вязкость наножидкостей (даже при малых концентрациях) не описывается классическими теориями для крупнодисперсных флюидов. Это согласуется с ранее полученными экспериментальными данными [5–7, 9]. В качестве примера на рис. 1 представлена зависимость коэффициента относительной вязкости $\eta_r = \eta / \eta_0$ наножидкости на основе

этilenгликоля при малых концентрациях частиц (η_0 – коэффициент вязкости базовой жидкости). Здесь прямоугольник соответствует частицам Al_2O_3 размером 50 нм, черные ромбы – CuO (100 нм), светлые ромбы – SiO_2 (40 нм). Даже при малых концентрациях частиц коэффициент вязкости существенно превосходит значение, предсказываемое теорией Эйнштейна [10]: $\eta_r = 1 + 2.5\phi$, где ϕ – объемная концентрация частиц.

При умеренных концентрациях частиц зависимость коэффициента вязкости наножидкости от объемной концентрации частиц можно описать соотношением

$$\eta_r = 1 + a\phi + b\phi^2. \quad (1)$$

Однако соотношение (1) не универсально, и для разных жидкостей существенно изменяется. Так, вязкость наножидкостей на основе воды с частицами Al_2O_3 (150 нм) и TiO_2 (150 нм) описывается соответственно формулами:

$$\eta_r = 1 + 6\phi + 72\phi^2; \quad (2)$$

$$\eta_r = 1 + 7.1\phi + 148\phi^2. \quad (3)$$

Такая неуниверсальность связана с двумя обстоятельствами: вязкость наножидкостей зависит от размера частиц и их материала. То, что вязкость зависит от размера частиц, было предсказано еще в 2006 г. с помощью молекулярной динамики [11]. Наши измерения подтверждают эту точку зрения. Некоторые из полученных данных представлены на рис. 2. Вязкость наножидкостей действительно зависит от размера частиц, и она увеличивается с его уменьшением.

Анализ данных, представленных на рис. 2, показывает, что вязкость наножидкостей (помимо размера частиц) зависит еще и от их материала. Это иллюстрируют данные для частиц размером 100 нм. Впервые факт зависимости вязкости наножидкости от размера частиц был установлен методом молекулярной динамики [12, 13]. Позже это удалось доказать экспериментально [14].

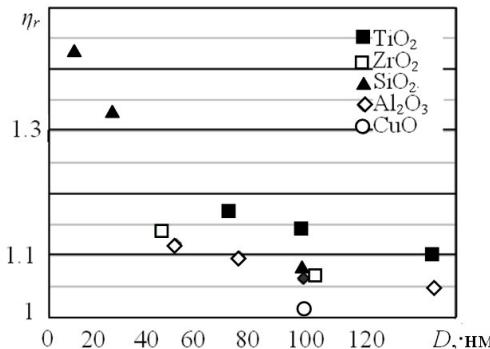


Рис. 2. Зависимость относительного коэффициента вязкости наножидкостей на основе воды от диаметра D наночастиц при фиксированной их концентрации (2 %)

Реология наножидкостей

Важным свойством наножидкостей является то, что их реология может отличаться от реологии базовой жидкости. В изучаемых наножидкостях в качестве базовых используются: вода, этиленгликоль, машинные масла и т.п., т.е. обычные ньютоновские жидкости. Тем не менее, созданные на их основе наножидкости в ряде случаев имеют неньютоновскую реологию даже при сравнительно небольших концентрациях частиц. В принципе изучение реологии наножидкостей является обязательным атрибутом, сопровождающим измерение ее вязкости, поскольку собственно о вязкости можно говорить лишь для ньютоновской жидкости. В обзорах [5, 6], посвященных исследованию вязкости наножидкостей, отмечается сравнительно немного работ, где была установлена их неньютоновская реология. Это правда связано с тем, что специализированные реометры для этой цели применялись редко, а во многих работах при изучении вязкости на ротационных вискозиметрах скорость сдвига не варьировалась в достаточно широких пределах, что совершенно необходимо. В настоящее время появилось уже немало работ, где неньютоновский характер реологии наножидкостей надежно установлен [15], хотя базовая жидкость в них была ньютоновской. Однако в большинстве работ, где изучалось изменение реологии

наножидкостей с увеличением концентрации частиц практически не варьировались их размеры. В данной работе влияние на реологию размера частиц систематически изучалось. Проведены измерения зависимости вязкости и тензора напряжений от скорости сдвига трех десятков наножидкостей. Неньютоновская реология зафиксирована примерно у четверти наножидкостей.

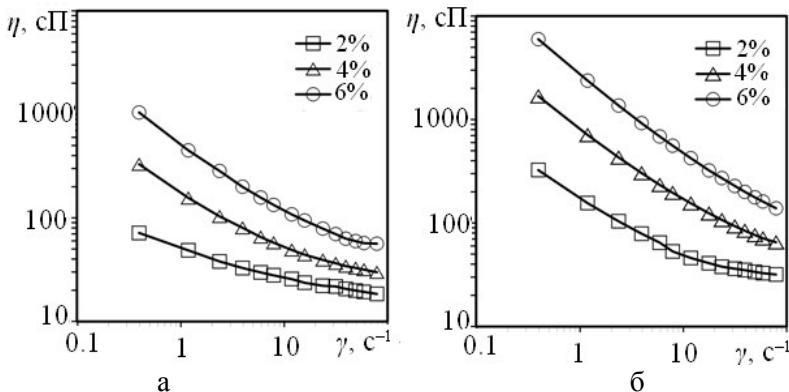


Рис. 3. Зависимость коэффициента вязкости от скорости сдвига для наножидкостей на основе этиленгликоля с частицами Al_2O_3 (а) и TiO_2 (б) размером 150 нм

Первая серия экспериментов была направлена на выяснение характера изменения реологии рассматриваемых наножидкостей при варьировании концентрации частиц. В частности, показано, что неньютоновское поведение демонстрируют наножидкости на основе этиленгликоля с частицами оксидов алюминия и титана. Размеры наночастиц в обоих случаях были очень близкими и равными 150 нм. Рассматривались три объемные концентрации наночастиц: 2, 4 и 6 %. Скорость сдвига варьировалась от 0.4 с⁻¹ до 80 с⁻¹. Зависимость коэффициента вязкости от скорости сдвига представлена на рис. 3. В обоих случаях наблюдается ярко выраженное неньютоновское поведение наножидкостей, которое усиливается с увеличением концентрации наночастиц. Чистый этиленгликоль является ньютонающей жидкостью. Ньютонающими оказываются и указанные наножидкости при

низких концентрациях наночастиц ($\varphi \leq 0.25\%$). Таким образом, можно констатировать, что переход от ньютоновской реологии наножидкостей к неニュтоновской наблюдается (если наблюдается) при увеличении концентрации наночастиц. Такое же поведение фиксировалось и в работах [16–18] при изучении реологии наножидкости на основе воды с частицами CuO (правда там использовался дисперсанта).

Чтобы установить характер реологии наножидкости, необходимо изучить зависимость ее тензора напряжений τ от скорости сдвига. Для рассматриваемых наножидкостей эта зависимость приведена на рис. 4. Данные зависимости имеют качественно различный характер. При больших концентрациях частиц (4 и 6 %) наблюдается наличие предельного напряжения, тогда как при наименьшей (2 %) в пределах точности измерения такое напряжение отсутствует. Зависимости, представленные на рис. 4, показывают, что наножидкости демонстрируют псевдо-пластическое или вязкопластическое поведение. Их молекулярная вязкость убывает с увеличением скорости сдвига (у вязкопластических, начиная с некоторого предельного значения напряжения). В первом случае для описания таких жидкостей обычно используют модель степенной жидкости (Power Law model):

$$\mu = k_v \dot{\gamma}^{n-1}, \quad (4)$$

а во втором – модель Хершеля–Балкли (Hershel–Bulkly):

$$\mu_f = (\tau_0 + k_v \dot{\gamma}^n) \dot{\gamma}^{-1}. \quad (5)$$

Здесь τ_0 – предел текучести вязкопластической жидкости; n – индекс жидкости; k_v – показатель консистентности.

По полученным экспериментальным данным были построены корреляции. В результате рассматриваемые наножидкости при концентрации частиц, равной 2 %, описываются моделью (4), а при более высоких концентрациях – моделью (5).

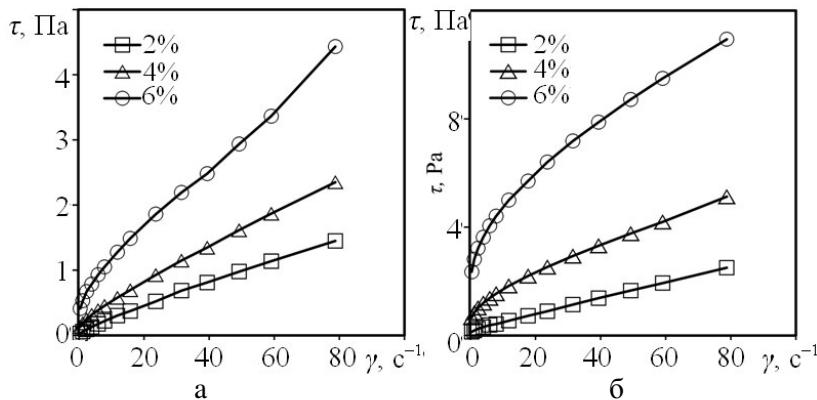


Рис. 4. Зависимость тензора напряжений от скорости сдвига для наножидкостей на основе этиленгликоля с частицами Al_2O_3 (а) и TiO_2 (б) размером 150 нм

Кроме того, установлено, что с ростом концентрации частиц индекс жидкости уменьшается, а показатель консистентности напротив растет, растет и предельное напряжение.

Выше уже указывалось, что вязкость наножидкостей зависит не только от концентрации наночастиц, но также от их размера. Жидкость вблизи наночастиц структурирована [19], поэтому если наночастицы достаточно малы, то структурированной оказывается вся дисперсная жидкость. По этой причине следует ожидать, что возможное изменение реологии наножидкости должно зависеть от размера наночастиц. Эксперименты показали, что это действительно так. Полученная зависимость коэффициента молекулярной вязкости от скорости сдвига представлена на рис. 5а. Наножидкости с крупными частицами (75 и 100 нм) являются ньютоновскими, тогда как с уменьшением размера частиц они демонстрируют неニュтоновское поведение.

Характер реологии определяется зависимостью напряжений от скорости сдвига. Соответствующие данные приведены на рис. 5б. Реология рассматриваемых наножидкостей при малых размерах частиц неплохо описывается моделью степенной жидкости (4), где $k_v = 96.8 \text{ мПа}\cdot\text{с}^n$; $n = 0.572$ для наножидкости с частицами 11 нм и $k_v = 28.1 \text{ мПа}\cdot\text{с}^n$; $n = 0.850$ – с частицами 50 нм.

В наножидкости с наименьшими частицами возможно появление предельных напряжений (см. рис. 5б). Однако точность измерений при малых скоростях сдвига оказалась не достаточной, чтобы однозначно это утверждать.

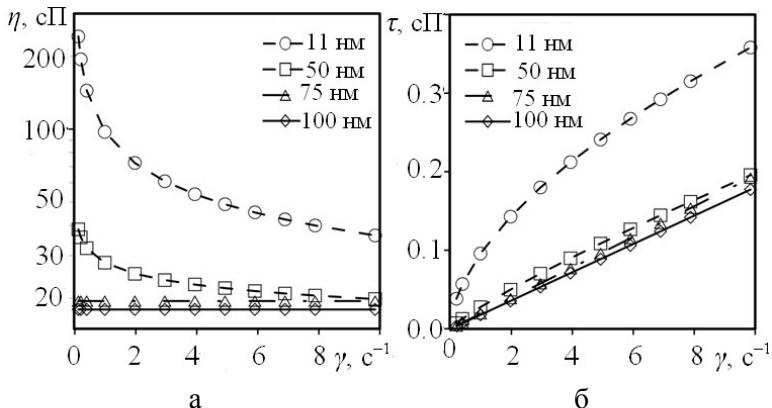


Рис. 5. Зависимость вязкости (а) и напряжения сдвига (б) наножидкости на основе этиленгликоля с добавлением частиц Al_2O_3 от скорости сдвига

Выводы

Изучена вязкость и реология нескольких десятков наножидкостей. Размеры наночастиц и их концентрация варьировались в достаточно широких пределах. Представленные экспериментальные данные позволяют сделать несколько важных выводов о вязкости наножидкостей и их реологии.

- Вязкость наножидкостей не описывается классическими теориями для крупнодисперсных суспензий.
- Вязкость наножидкостей существенно выше вязкости крупнодисперсных суспензий.
- Вязкость наножидкостей зависит не только от концентрации наночастиц, но также от их размера (и она тем больше при фиксированной концентрации частиц, чем меньше размер частиц).

- В ряде случаев наножидкости имеют неньютоновскую реологию. Появление неньютоновских свойств определяется некоторыми факторами: концентрацией наночастиц, их размером и материалом, свойствами базового флюида.
- Изменение реологии от ньютоновской к неньютоновской происходит с ростом концентрации наночастиц. Все исследованные неньютоновские наножидкости оказались либо псевдопластическими, либо вязкопластическими.
- Важным параметром, от которого зависит реология наножидкости, является размер частиц. Установлено, что переход от ньютоновского поведения к неньютоновскому в ряде случаев происходит при заданной объемной концентрации с уменьшением размеров наночастиц.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 17-01-00040, № 17-58-45023) и РНФ (проект № 17-79-20218).

Список литературы

1. Wang, X-Q. A review on nanofluids. – Part II. Experiments and applications / X-Q. Wang, A. S. Mujumdar // Brazilian J. Chem. Eng. – 2008. – Vol. 25 (4). – P. 631–648.
2. Wong, K. V. Applications of Nanofluids: Current and Future / K. V. Wong, De Leon O. // Advances in Mech. Eng. – 2010. – Vol. 2010. – Article ID 519659.
3. Yu W. A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications / W. Yu, H. Xie // J. Nanomaterials. – 2012. – Vol. 2012. – Article ID 435873.
4. Рудяк, В. Я. Современные проблемы микро- и нанофлюидики / В. Я. Рудяк, А. В. Минаков. – Новосибирск : Наука. – 2016. – 296 с.
5. Hosseini, S. Sh. A review of relations for physical properties of nanofluids / S. Sh. Hosseini, A. Shahrjerdi, Y. Vazifeshenas // Australian J. Basic Applied Sci. – 2011. – Vol. 5 (10). – P. 417–435.

6. *Mahbubul, I. M.* Latest developments on the viscosity of nanofluids / I. M. Mahbubul, R. Saidur, M. A. Amalina // International J. Heat and Mass Transfer. – 2012. – Vol. 55. – P. 874–885.
7. Viscosity measurements on colloidal dispersions (nanofluids) for heat transfer applications / D. C. Venerus [et al.] // Applied Rheology. – 2010. – Vol. 20, No. 4. – P. 44582.
8. Effect of particle size on the viscosity of nanofluids: A review / H. D. Koca [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82. – P. 1664–1674.
9. Рудяк, В. Я. Современное состояние исследований вязкости наножидкостей / В. Я. Рудяк // Вестник Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. – 2015. – Т. 10, вып. 1. – С. 5–22.
10. Einstein, A. Eine neue Bestimmung der Molekiildimensionen / A. Einstein // Annalen der Physik. – 1906. – Vol. 19. – P. 289–306.
11. Моделирование процессов переноса методом молекулярной динамики. II. Сила сопротивления и эффективная вязкость в наносупспензиях / В. Я. Рудяк, А. А. Белкин, В. В. Егоров, Е. А. Томилина. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2006. – № 1 (18). – 52 с.
12. Rudyak, V. Ya. Dependence of the viscosity of nanofluids on nanoparticle size and material / V. Ya. Rudyak, S. L. Krasnolutskii // Physics Letters A. – 2014. – Vol. 378. – P. 1845–1849.
13. Рудяк, В. Я. Моделирование коэффициента вязкости наножидкости методом молекулярной динамики / В. Я. Рудяк, С. Л. Краснолуцкий // ЖТФ. – 2015. – Т. 85, вып. 6. – С. 9–16.
14. Экспериментальные данные о зависимости вязкости наножидкостей на основе воды и этиленгликоля от размера и материала частиц / В. Я. Рудяк, А. В. Минаков, М. С. Сметанина, М. И. Пряжников // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 467, № 3. – С. 289–291.
15. Sharma, A. K. Rheological behaviour of nanofluids: A review / A. K. Sharma, A. K. Tiwari, A. R. Dixit // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 53. – P. 779–791.

16. *Measuring the heat-transfer coefficient of nanofluid based on copper oxide in a cylindrical channel* / D. V. Guzei, A. V. Minakov, V. Ya. Rudyak, A. A. Dekterev // Technical Physics Letters. – 2014. – Vol. 40. – Issuer 3. – P. 203–206.
17. *Measurement of the heat transfer coefficient of a nanofluid based on water and copper oxide particles in a cylindrical channel* / A. V. Minakov, V. Ya. Rudyak, D. V. Guzei, A. S. Lobasov // High Temperature. – 2015. – Vol. 53, No. 2. – P. 246–253.
18. *The experimental and theoretical study of laminar forced convection of nanofluids in the round channel* / A. V. Minakov, A. S. Lobasov, D. V. Guzei, M. I. Pryazhnikov, V. Ya. Rudyak // Appl. Thermal Eng. – 2015. – Vol. 88. – P. 140–148.
19. *Rudyak, V. Ya. Viscosity of nanofluids. Why it is not described by the classical theories* / V. Ya. Rudyak // Advances in Nanoparticles. – 2013. – Vol. 2. – P. 266–279.

УДК 72.035

КРУПНЕЙШИЙ ГРАДОСТРОИТЕЛЬ РОССИЙСКОЙ ИМПЕРИИ ПЕРВОЙ ТРЕТИ XIX ВЕКА ВАСИЛИЙ ИВАНОВИЧ ГЕСТЕ (WILLIAM HASTIE)

А.А. Гудков*

Рассматривается градостроительное творчество архитектора, шотландца по происхождению, Василия Гесте (William Hastie). Несмотря на высокое положение, занимаемое им в Министерстве Полиции, – рассмотрение и переделывание городовых планов по всему государству – в научных исследованиях до сих пор не решен вопрос о количестве проектных планов, составленных в этот период. На основании архивных материалах, впервые делается попытка очертить параметры его градостроительного наследия.

Ключевые слова: история градостроительства, русское градостроительство, Василий Гесте, William Hastie.

Архитектурное творчество Вильяма Гесте и Адама Менелас началось в России. На родине, как и Камерон, они не возвели ни одной самостоятельной постройки. К сожалению, творчество этих двух мастеров еще недостаточно изучено, хотя вряд ли их можно причислить к разряду второстепенных зодчих. Гесте стал одним из крупнейших градостроителей России начала XIX в., а Менелас создал несколько великолепных усадеб на Украине и под Москвой, а кроме того, внес значительный вклад в развитие Царского Села и Петергофа в качестве архитектора Императорского кабинета.

Д.О. Швидковский

Одним из самых «загадочных» архитекторов первой трети XIX в. можно смело назвать Василия Гесте, а точнее William Hastie. И дело даже не в том, что о нем мало публикаций в научной литературе (М. Коршунова, С. Кузнецов, В. Пилявский,

* Канд. архитектуры, профессор кафедры архитектуры и реконструкции городской среды НГАСУ (Сибстрин)

Т. Ручинская, Л. Чернозубова, Д. Швидковский и др.), а скорее в том, что в них рассматривается в основном начало его профессиональной деятельности. Между тем, став 12 января 1806 г. главным архитектором города Царское Село (рис. 1) и проработав в этой должности до конца своих дней (4 июля 1832 г.), он никаких официальных должностей более не занимал.

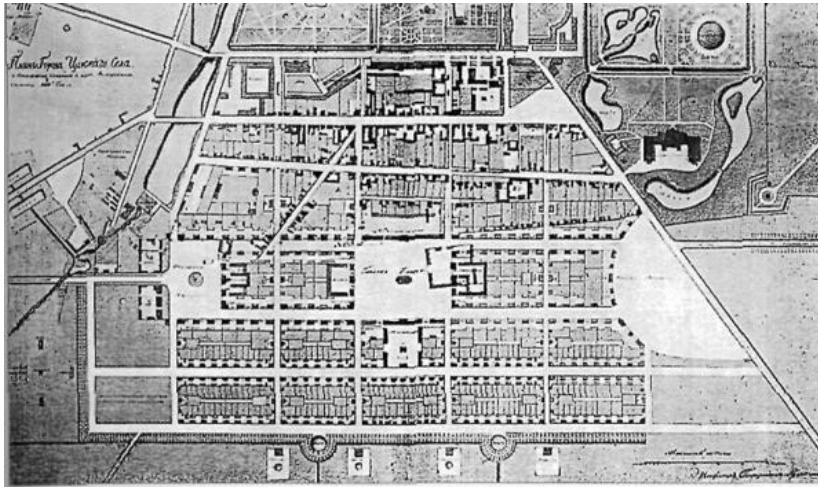


Рис. 1. План города Царское Село 1810 г., архитектор В.И. Гесте

Таким образом, практически 20 лет он проработал главным архитектором небольшого городка. Хотя городок был совсем маленький, но пост архитектора в нем был одним из самых видных для зодчего, работавшего в России. Так как Царское Село было излюбленной императорской резиденцией и являлось как бы «полигоном» новых архитектурных идей, где опробовались образцы устройства поселений, типы домов и стили архитектурного убранства.

После утверждения плана Царского Села императором Вильям Гесте в 1810 г. был прикомандирован к Министерству Полиции, где ему поручалось рассмотрение и переделывание городовых планов по всему государству. В декабре 1811 г. Гесте

представил министру полиции служебную записку о мерах, необходимых для приведения городских планов в надлежащий порядок. Он предлагал собрать всякой губернии планы Губернского, Уездного и прочих городов, которые ранее были утверждены и нанести на них кварталы для будущего строения. Кроме того, архитектор считал необходимым получить геодезические планы городов, которые требуются к переделке, затем сочинить проекты, смотря по местоположению и прочим обстоятельствам.

О каком количестве городов могла идти речь? Согласно административной реформе 1775 г. «Об учреждении и управлении губерниями», в России было учреждено: 2 столицы; 50 губернских центров; 493 уездных города; 186 заштатных городов. Таким образом, в России в конце XVIII в. насчитывался 731 город. Естественно, что в период деятельности Комиссии о каменном строении Санкт-Петербурга и Москвы (1762–1796 гг.) некоторые города получили утвержденные Императрицей генеральные планы. Согласно исследованиям Т.Е. Каменевой «Принципы перепланировки русских городов во второй половине XVIII века», конфирмовано было 304 плана. Таким образом, получается, что к моменту начала работы В.И. Гесте в качестве эксперта по рассмотрению и переделыванию городских планов по всему государству, городов, не имевших законодательно утвержденных проектных планов своего развития, насчитывалось 427.

Согласно служебной записки, переданной В. Гесте министру полиции, рекомендовалось: «По утверждению коих (планов А.Г.) сделать двойные копии и переплести в книги, и одну из них хранить в Петербурге, а другую – послать в Губернский город для исполнения». Так начался процесс сбора и хранения конфирмованных планов, вылившийся в издание в 1839 г. приложения к ПСЗ РИ «Книга чертежей и рисунков. Планы городов». В издание вошли планы 419 городов. Из них 71 были утверждены в период градостроительной работы Гесте (1810–1832 гг.). Исходя из нашей логики рассуждений к концу 1840-х гг. без утвержденных проектных планов оставалось 312 городов.

Остается нерешенным вопрос, а все ли планы, получившие высочайшее утверждение, вошли в специальный том («Книга чертежей и рисунков. Планы городов») приложения к ПСЗ РИ. И здесь смело можно ответить – нет, не все. Работая в РГИА г. Санкт-Петербурга были обнаружены проектные планы, подписанные архитектором В. Гесте, но не вошедшие в вышеизложенное издание (их достаточно много). Как правило, это планы небольших городов Киевской, Архангельской, Пензенской, Саратовской губерний. В эту же группу попали планы и крупных губернских городов, например Красноярска 1828 г. (рис. 2) и Омска 1829 г. (рис. 3)



Рис. 2. Проектный план Красноярска, архитектор В.И. Гесте

Подводя итог всему вышеизложенному, можно смело утверждать, что в период работы В. Гесте в Министерстве Полиции (1810–1832 гг.), было составлено и конфирмовано более 100 планов городов Российской империи.

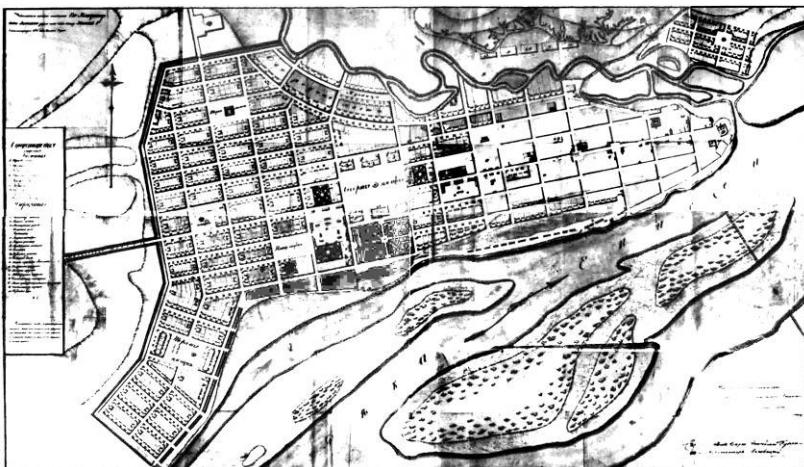


Рис. 3. Проектный план Омска, архитектор В.И. Гесте

Список литературы

1. Гудков, А. Планировочные работы В.И. Гесте в городах Сибири / А. Гудков // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1988. – № 12. – С. 47–53.
2. Коршунова, М. Архитектор Гесте / М. Коршунова // Труды Государственного Эрмитажа. – 1977. – Т. XVIII. – С. 132–143.
3. Кузнецов, С. Вильям Гесте / С. Кузнецов // Зодчие Санкт-Петербурга XIX – начало XX века. – Санкт-Петербург, 2000. – С. 123–131.
4. Пилявский, В. Градостроительные мероприятия и образцовые проекты в России в начале XIX века / В. Пилявский // Сб. научных трудов ЛИСИ. – 1958. – Вып. 21. – С. 75–108.
5. Чернозубова, Л. Образцовые проекты планировки кварталов / Л. Чернозубова // Архитектурное наследство. – 1963. – № 15. – С. 188–192.

6. Швидковский, Д. Шотландские мастера в России эпохи ампира: Вильям Гесте и Адам Менелас / Д. Швидковский // Архитектура в истории русской культуры. Стиль ампир. – Москва, 2003. – Вып. 5. – С. 68–90.
7. Ruchinskaya, T. The Scottish architectural traditions in the plan for the reconstruction of Moscow after the fire of 1812 / T. Ruchinskaya // Building Research & Information. – 1994. – Vol. 22 (4). – P. 228–333.
8. Shvidkovsky, D. Classical Edinburgh and Russian Town-Planning of the late 18th and early 19th centuries: The role of William Hastie (1755–1832) / D. Shvidkovsky // Architectural Heritage. – 1991. – Vol. 2 (1). – P. 69–78.
9. Schmidt, A. J. William Hastie. Scottish Planner of Russian Cities / A. J. Schmidt // Proceedings of the American Philosophical Society. – 1970. – Vol. 114. – P. 226–243.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 69.059

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УГЛЕВОЛОКНА ПРИ УСИЛЕНИИ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

В.А. Бабенкова^{*}, Л.А. Немчикова^{}**

Рассмотрена технология усиления каменных конструкций углеволокном в сейсмических районах. Выполнено исследование моделей стен с ослаблением.

Ключевые слова: сейсмичность, усиление, углеволокно, SCAD, MathCad.

Введение

Всем известно опасное воздействие горных разработок на строительные конструкции зданий, расположенных на данных территориях.

В соответствии с СП «Строительство в сейсмических районах» [1] возможными конструктивными решениями в этих условиях являются:

- 1) изменение объемно-планировочных решений путем:
 - разделения зданий сложных конструктивных схем на отсеки простой формы антисейсмическими швами;
 - разборки верхних этажей здания;
 - устройства дополнительных элементов жесткости для обеспечения симметричного расположения жесткостей в пределах отсека и уменьшения расстояния между ними;

2) усиление стен, рам, вертикальных связей для обеспечения восприятия усилий от расчетных сейсмических воздействий.

^{*} Магистрант НГАСУ (Сибстрин)

^{**} Канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и организации строительства НГАСУ (Сибстрин)

Усиление конструкций часто более рентабельно, чем новое строительство, поэтому в современном мире все чаще появляются новые способы усиления уже существующих конструкций.

Для исследования выбран способ усиления композитными материалами, которые не утяжеляют конструкции, позволяют снизить трудозатраты и сократить расходы на ремонт за счет увеличения межремонтного периода. Способ достаточно удобен для дальнейшей эксплуатации и соответствует современным требованиям.

Усиление предлагается выполнить наклеиванием на поверхность усиливаемых конструкций высокопрочного материала – углеродного волокна в виде холстов или сетки. Применение систем внешнего армирования на основе углеволокна в сейсмопасных районах сейсмичностью 7, 8 и 9 баллов позволяет снизить сейсмические нагрузки в 1,5–4 раза [2].

Примеров использования этого способа достаточно. Например, усиление перекрытий в Государственном Кремлевском дворце, Новосибирском ТЦ «Мега», где причиной усиления стали возросшие эксплуатационные нагрузки, превышающие проектные.

Цель работы и постановка задач

Доказать, что усиление углеволокном увеличивает прочность конструкций и работает как бандаж при раскрытии трещин. При этом создать математическую модель, которая может рассчитать, насколько увеличится несущая способность конструкции за счет такого усиления.

Задачи:

- 1) Физическая часть – создать модель в программе SCAD и рассчитать ее несущую способность при действии сейсмической нагрузки.
- 2) Математическая часть – в программе MathCad создать математическую модель в виде формул, которая рассчитывает несущую способность, добавленную за счет усиления углеволокном (при этом рассмотреть несколько

- вариантов наклейки материала). Рассчитать несущую способность согласно нормативному документу СП «Каменные и армокаменные конструкции» [3] и найти в процентном соотношении насколько она увеличивается.
- 3) Опытная часть – лабораторными испытаниями на нескольких образцах с различной наклейкой углеволокна доказать, что это усиление работает как бандаж.

Физическая модель

В программе SCAD была создана модель стены с ослаблением, которая по характеристикам максимально приближена к кирпичным стенам, которые находятся в районах с техногенными сейсмическими воздействиями. Конструкция стены принята по проблемному зданию, находящемуся в Кемеровской области.

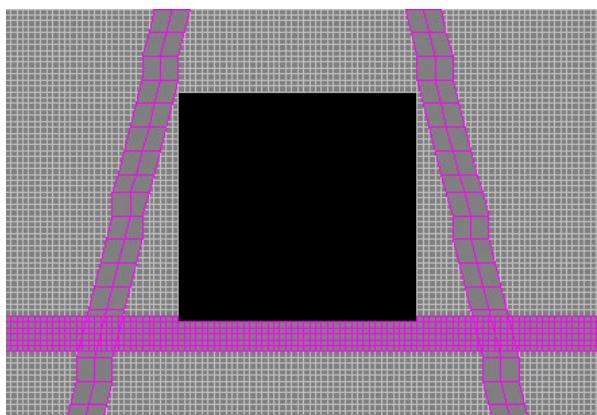


Рис. 1. Модель в программе SCAD

Стена и перемычка замоделированы как объемные элементы, а углеволокно – как оболочка. Заданы совпадающие узлы в местах возможного появления трещин.

Программа выполнила расчет, и несущая способность достигла 85 т.

Математическая модель

Несущая способность кладки [4]:

$$Q_{n.s} = Q_k + Q_f , \quad (1)$$

где Q_k – несущая способность кладки без усиления; Q_f – прирост несущей способности от внешнего армирования из композитной сетки на основе базальтового или углеволокна.

Несущая способность каменной кладки без усиления определяется как минимальное значение несущей способности при внецентренном сжатии, действии главных растягивающих напряжений и срезе:

$$Q_k = \min(Q_{csc}, Q_{pacm}, Q_{cp}) . \quad (2)$$

Для каждого вида наклейки исходные данные свои.

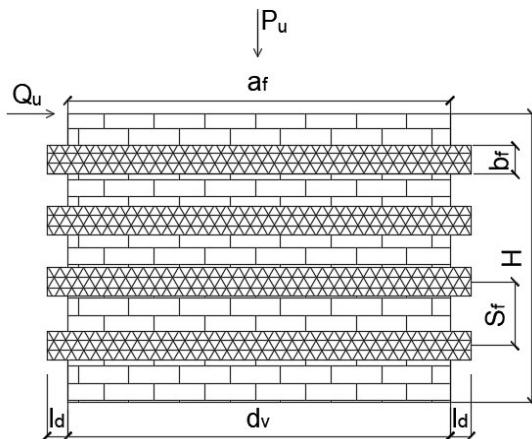


Рис. 2. Горизонтальная наклейка холстов: Q_u – горизонтально действующая нагрузка; P_u – вертикально действующая нагрузка; l_d – нахлест

При горизонтальной наклейке несущая способность находится по формуле

$$Q_f = p_{fv} \cdot \frac{d_v}{S_f}, \quad (3)$$

где p_{fv} – полное усилие, приходящееся на холст Па·м²; d_v – эффективная глубина для расчета сдвига, м; S_f – шаг холстов, м.

$$d_v = \min(H, L), \quad (4)$$

где H – высота стены, м; L – длина стены, м.

$$p_{fv} = A_f \cdot R_f, \quad (5)$$

где A_f – площадь сечения холста из композитной сетки, м²; R_f – эффективное напряжение в холсте, Па.

$$A_f = n \cdot t_f \cdot b_f, \quad (6)$$

где n – число слоев композитной сетки; t_f – толщина холста из композитной сетки, м; b_f – ширина холста, м.

$$R_f = E_f \cdot \varepsilon_f, \quad (7)$$

где E_f – нормативное значение модуля упругости сетки, ГПа; ε_f – расчетная деформация растяжения, Па.

$$\varepsilon_f = C_E \cdot \delta_f, \quad (8)$$

где C_E – коэффициент условий работы, учитывающий влияние окружающей среды (0,9 – для внутренних помещений; 0,8 – для наружных конструкций); δ_f – предельная деформация разрыва холста, Па.

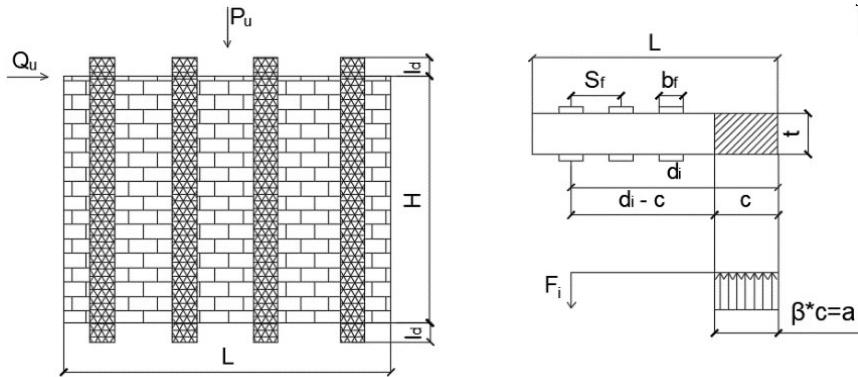


Рис. 3. Вертикальная наклейка холстов

При вертикальной наклейке несущая способность находится по формуле

$$Q_f \leq \frac{M_n}{k \cdot H}, \quad (9)$$

где M_n – изгибающий момент; k – количество холстов.

$$k = \frac{d_v}{S_f}. \quad (10)$$

Изгибающий момент

$$M_n = \sum F_i \cdot \left(d_i - \frac{\beta \cdot c}{2} \right) + P_u \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{\beta \cdot c}{2} \right), \quad (11)$$

где d_i – расстояние до середины ленты, м; β – коэффициент приведения эпюры к прямоугольному виду ($\beta = 0,7$); c – размер сжатой зоны, м.

При диагональной наклейке несущая способность

$$Q_f = p_{fv} \cdot b_f \cdot \frac{d_v}{S_f} \cdot \cos \alpha, \quad (12)$$

где α – угол наклона холстов из композитной сетки, град.

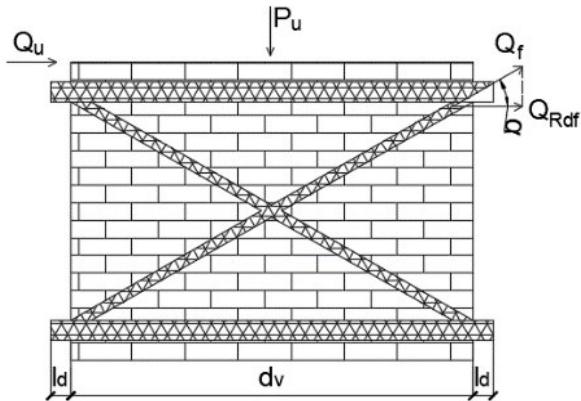


Рис. 4. Диагональная наклейка холстов

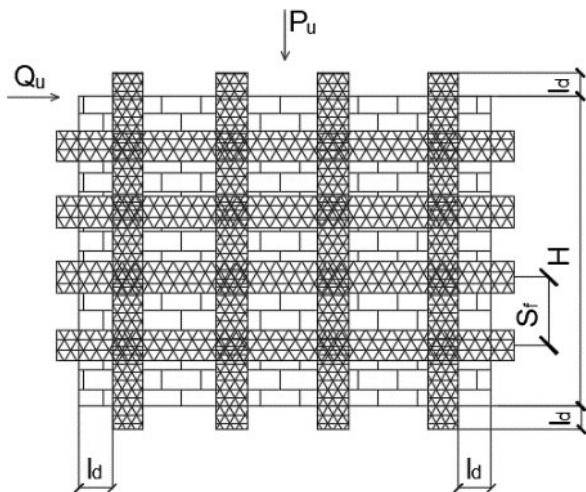


Рис. 5. Смешанная наклейка холстов

При диагональной наклейке несущая способность

$$M_n = A_f \cdot R_f \left(d_i - \frac{\beta \cdot c}{2} \right) + P_u \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{\beta \cdot c}{2} \right). \quad (13)$$

Для расчета несущей способности в программе MathCad достаточно выбрать вид наклейки, заполнить исходные данные и на экране появится результат.

Результат расчета для модели, которая принята в SCAD, с диагональной наклейкой 99,4 Н ≈ 10,14 т. То есть углеволокно увеличило несущую способность кладки на 10,14 т.

Согласно СП «Каменные и армокаменные конструкции» [3] несущая способность рассчитывается по формуле

$$N \leq m_g \cdot \varphi_1 \cdot R \cdot A_c \cdot \omega, \quad (14)$$

где m_g – коэффициент, учитывающий влияние длительной нагрузки; φ_1 – коэффициент продольного изгиба; R – расчетное сопротивление сжатию кладки; A_c – площадь сечения элемента; ω – коэффициент, определяемый по таблице СП.

Согласно расчетам, несущая способность кладки без усиления 76 т.

Опытная модель

На образцы из кирпича были наклеены углеволокно и стекловолокно в различных направлениях. Испытания проводились на вибростоле, где образец был тщательно закреплен с помощью уголков и самодельных струбцин (для жесткой заделки) (рис. 6).

Испытания проводили в несколько этапов: установку включали на 1 с, 5 с, 1 мин и т.д. Физический износ определяется согласно ВСН 53-86(р) [5, табл. 10]. Результаты опыта представлены в виде графиков на рис. 7. Они показывают, что при повышении физического износа несущая способность снижается.

По окончании испытания произошло расслоение кладки по всем рядам, а углеволокно сохранило свое сцепление с конструкцией.

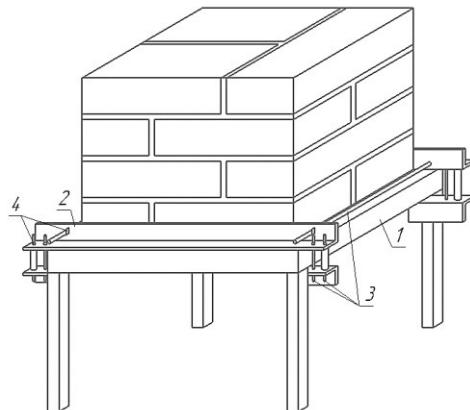


Рис. 6. Опытная установка: 1 – вибростол; 2 – уголок 30×30;
3 – шпильки; 4 – гайки

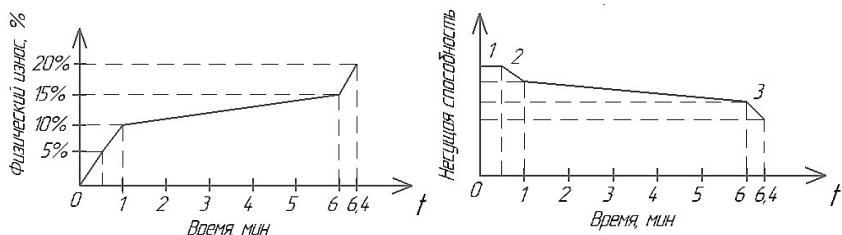


Рис. 7. Результаты опыта: 1 – нет признаков; 2 – появление микротрещин, высыпание раствора; 3 – расслоение кладки



Рис. 8. Результат испытания

Заключение

В работе использованы две программы и произведен расчет согласно нормативным документам.

Опытные исследования доказывают, что углеволокно позволяет сохранять конструкцию неизменной, не давая ей разрушаться.

В программе MathCad разработана математическая модель, которая содержит формулы для расчета увеличения несущей способности кладки за счет усиления.

Сравнение результатов, полученных по нормативному документу: ручной расчет – 76 т; в программе SCAD – 85 т. Доля усиления составила

$$1 - \frac{76 \text{ т}}{85 \text{ т}} = 0,1059 \rightarrow 10,59 \%$$

Сравнение результатов, полученных по нормативному документу: ручной расчет – 76 т; в математической модели – 10,14 т. Доля усиления составила

$$1 - \frac{76 \text{ т} + 10,14 \text{ т}}{76 \text{ т}} = 0,1334 \rightarrow 13,34 \%$$

В результате получено среднее значение:

$$\frac{10,59 + 13,34}{2} = 11,96 \approx 12 \%$$

При усилении углеволокном несущая способность, согласно исследованиям, увеличивается примерно на 12 %. Так как результат расчетов в модели и программе получился почти одинаковым, можно сделать вывод о том, что эту математическую модель можно использовать при расчетах усиления волокном в сейсмоопасных регионах.

Список литературы

1. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах : актуализированная редакция СНиП II-7-81* : введ. 01.06.2014 / Минстрой России. – Москва : ФАУ «ФЦС», 2016. – 168 с.

2. Холдинговая компания «Композит» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hccomposite.com>
3. СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции : актуализированная редакция СНиП II-22-81* : введ. 01.01.2013 / Минстрой России. – Москва : ФАУ «ФЦС», 2013. – 78 с.
4. Альбом технических решений по применению базальтовой сетки Гридекс в строительстве. – Москва, 2016. – 71 с.
5. ВСН 53-86(р). Правила оценки физического износа жилых зданий : введ. 07.01.1987 // Техэксперт. Электронный фонд правовой и нормативной документации [Электронный ресурс].
6. Джамаев, Б. К. Прочность и деформативность стен из ячеистобетонных блоков при статических и динамических воздействиях / Б.К. Джамаев – Москва, 2012. – 232 с.

НАДЕЖНОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ С ДИНАМИЧЕСКИМ ГАШЕНИЕМ КОЛЕБАНИЙ В ОБЛАСТЯХ СГУЩЕНИЯ СПЕКТРА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ

Ю.А. Гербер*, В.Г. Себешев**

Изучены и описаны специфические особенности расчетов надежности гармонически нагруженных систем, защищенных динамическими гасителями колебаний, имеющих при некоторых комбинациях расчетных параметров группы сближенных собственных частот. Оценено влияние основных стохастических характеристик системы и гасителя на показатели надежности. Показана зависимость диапазона допустимых рабочих частот вибрационного воздействия от изменений массы гасителя. Представлены количественные результаты расчетов надежности по условию ограничения величины динамического коэффициента модельной системы с двумя степенями свободы масс, подтверждающие качественные выводы. Полученные результаты позволяют формулировать требования к расчетным параметрам системы и гасителя с учетом ограничений по надежности конструкции.

Ключевые слова: надежность, вероятность отказа, динамический гаситель колебаний, система с конечным числом степеней свободы, гармоническая нагрузка, резонанс, сближенные собственные частоты, динамический коэффициент, амплитудно-частотные характеристики.

Несущие конструкции зданий и сооружений могут испытывать различного рода динамические воздействия, в том числе циклические (от промышленного и технологического оборудования, ветровые нагрузки и др.), вызывающие колебания, особенно значительные при частотах, близких к резонансным. Одним из практически апробированных способов борьбы с вибрациями строительных объектов является установка динамических гасителей колебаний (ДГК), рациональное использование кото-

* Аспирант, ст. преподаватель кафедры строительной механики НГАСУ (Сибстрин)

** Канд. техн. наук, профессор кафедры строительной механики НГАСУ (Сибстрин)

рых позволяет снизить нежелательные динамические эффекты до допустимых уровней. В зависимости от вида внешнего воздействия и свойств защищаемой системы (сооружения, конструкции) могут применяться как одномассовые [1], так и много-массовые ДГК [2], причем характеристики гасителя должны назначаться с учетом стохастической природы расчетных параметров защищаемой системы и самого гасителя – это принципиально важно потому, что следствием случайных отклонений параметров от их проектных значений может быть не только ослабление эффекта гашения, но и ухудшение динамического состояния объекта с ДГК в сравнении с незащищенной системой из-за того, что одномассовому динамическому гасителю колебаний (ОДГК) отвечает дополнительная степень свободы и соответственно добавляющаяся частота собственных колебаний, меньшая, чем рабочая частота воздействия, на которую настраивается гаситель, и близкая к ней. При этом возрастают диапазоны разбросов параметров динамического напряженно-деформированного состояния (НДС) системы даже при небольшой изменчивости рабочей частоты и некоторых собственных параметров сооружения/конструкции, так как в частотной области настройки гасителя возникают большие градиенты амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) системы, что, в свою очередь, неблагоприятно оказывается на оценках ее надежности [3]. Вариативность расчетных параметров системы с гасителем особенно сильно влияет на показатели надежности в случае попадания рабочей частоты воздействия в область сгущения спектра собственных частот исходной (незащищенной) системы, характеризующуюся большими градиентами АЧХ.

Очевидно, что применение ДГК, принципиально ориентированное на улучшение динамического состояния строительных систем, должно осуществляться с учетом требований обеспечения необходимого уровня надежности, в частности, в соответствии с современными нормативными документами (Eurocodes [4], ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» и т.п.).

Актуальной становится задача расчета надежности строительных систем, в спектрах частот собственных колебаний которых изначально имеются области со сближенными частотами, защищенных ДГК. Цель работы – оценка влияния параметров ДГК на надежность систем, обладающих указанной частотной особенностью.

Предварительно рассмотрим не защищенную гасителем деформируемую систему. При определенных комбинациях расчетных параметров, характеризующих ее структурные, геометрические и жесткостные свойства, возможно сближение некоторых двух соседних собственных частот ω_j и ω_{j+1} . Пренебрегая влиянием на параметры НДС системы при колебаниях с частотами, близкими к указанным, других собственных частот, достаточно удаленных от ω_j и ω_{j+1} , оценим соотношение ω_{j+1}/ω_j как в случае двух степеней свободы масс. Для отыскания условия максимально возможного сближения ω_j и ω_{j+1} используем выражения двух этих частот, получаемые решением частотного уравнения [5, 6, 7], откуда следует условие равенства частот $\omega_j = \omega_{j+1}$:

$$(r_{jj}k_m - r_{j+1,j+1})^2 + 4k_m r_{j,j+1}^2 = 0 , \quad (1)$$

где $k_m = m_{j+1}/m_j$; m_j, m_{j+1} – массы, соответствующие степеням свободы; r_{ik} ($i, k = j, j+1$) – элементы матрицы внешней жесткости системы по направлениям степеней свободы масс.

Выполнение (1) возможно только при $r_{j,j+1} = 0$, тогда из (1) следует

$$k_m = k_r , \quad (2)$$

где $k_r = r_{j+1,j+1}/r_{jj}$.

Если $r_{j,j+1} \neq 0$, то $\omega_{j+1} > \omega_j$, причем

$$\lim_{\substack{r_{j,j+1} \rightarrow 0 \\ k_r \rightarrow k_m}} \frac{\omega_{j+1}}{\omega_j} = 1. \quad (3)$$

На рис. 1 показан принципиальный вид графика отношений пары близких собственных частот в зависимости от характеристики жесткости системы k_r при фиксированном k_m и $r_{j,j+1} = 0$. Отметим, что в точке совпадения частот главные формы колебаний, соответствующие большей и меньшей из частот ω_j и ω_{j+1} , меняются местами.

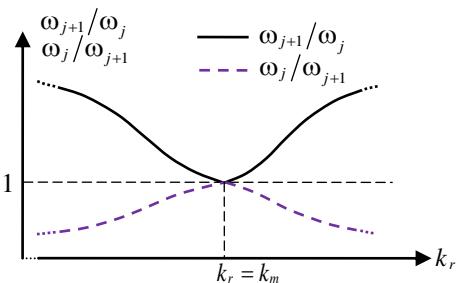


Рис. 1. График отношений собственных частот

Получение аналогичных аналитических зависимостей для систем с большим числом степеней свободы масс затруднительно; в этих случаях оценка сближения частот собственных колебаний возможна по результатам определения частот численными методами.

Для систем, моделируемых расчетной схемой с двумя степенями свободы масс ($n = 2$), представленное решение — точное; в частности, возможно $\omega_2/\omega_1 \rightarrow 1$, например, для симметричных ($r_{12} = 0$) рам (рис. 2,*a*), балок (рис. 2,*б*) и др. при характеристиках конструкций, удовлетворяющих условию (2). В общем случае при $n > 2$ вышеизложенный подход можно использовать как приближенный для некоторой пары близких собственных частот ω_j и ω_{j+1} .

Для симметричных систем с тремя степенями свободы ($n = 3$), имеющих одну главную форму колебаний одного типа (симметричную или обратносимметричную), а две остальных – другого (ортогонального) типа, также возможно точное решение.

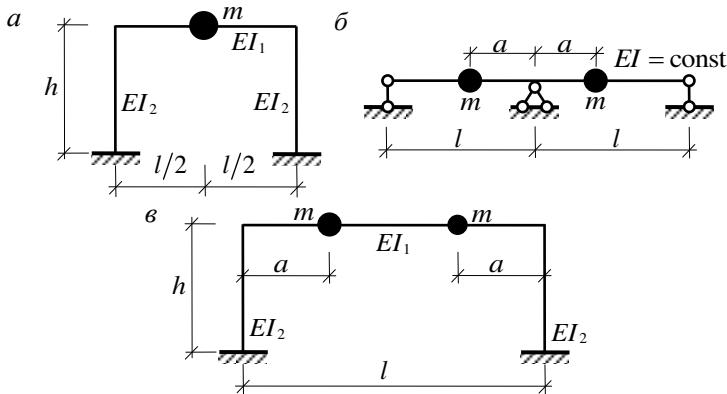


Рис. 2. Схемы симметричных стержневых систем:
а, б – с двумя степенями свободы ($n = 2$); в – $n > 2$

Так, при разных комбинациях расчетных параметров плоской симметричной рамы (рис. 3,а), для которой в пренебрежении продольными деформациями стержней $n = 3$, возможны 6 вариантов сближения частот собственных колебаний (рис. 3,б–ж), из них варианты по рис. 3,е, ж маловероятны. К парам главных форм с соответствующими близкими частотами можно применять полученные выше оценки. Это возможно также в отношении симметричных систем с $n = 4$, если симметричных и обратносимметричных главных форм – поровну (по две), как, например, у рамы по рис. 2, в случае учета изгибных и продольных деформаций элементов. Принципиально возможно для частотного диапазона, обусловленного задаваемой рабочей частотой, использовать приемы приведения систем с любым числом степеней свободы к модели с эквивалентными массами, имеющими $n = 2$ – 3 , в частности, методом конденсации [8].

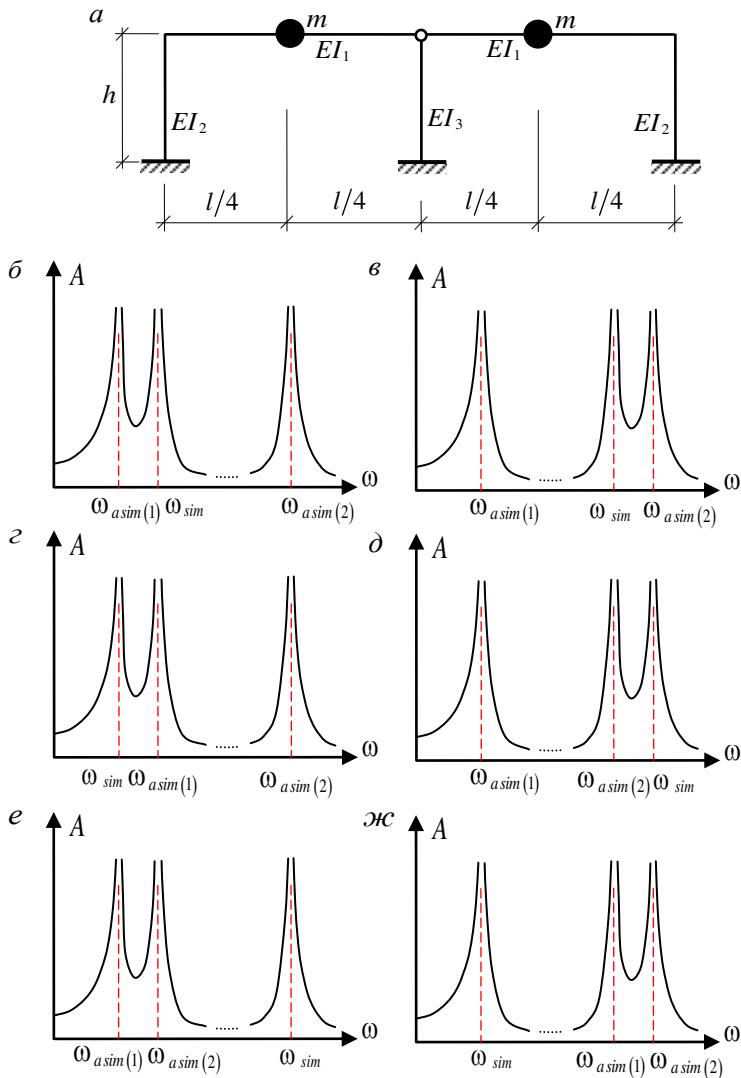


Рис. 3. Система с тремя степенями свободы масс (*a*),

возможные варианты АЧХ (*δ–жс*);

A – амплитуда параметра НДС; ω – частота воздействия

В качестве модельной задачи рассмотрена стержневая система с двумя степенями свободы масс и ОДГК (рис. 4,*a*). Все расчетные параметры системы являются случайными величинами с известными вероятностными свойствами. При определенных их комбинациях, как показано выше, незащищенная система может иметь сближенные собственные частоты.

Для достижения максимального эффекта гашения параметры гасителя следует назначать из условия

$$c_d m_d^{-1} = \omega_F^2, \quad (4)$$

здесь c_d и m_d – математические ожидания (МО) жесткости и массы гасителя.

В детерминистическом решении без учета демпфирования это, как известно [1], обеспечивает полное гашение колебаний при расположении ДГК в точке приложения одиночной сосредоточенной нагрузки.

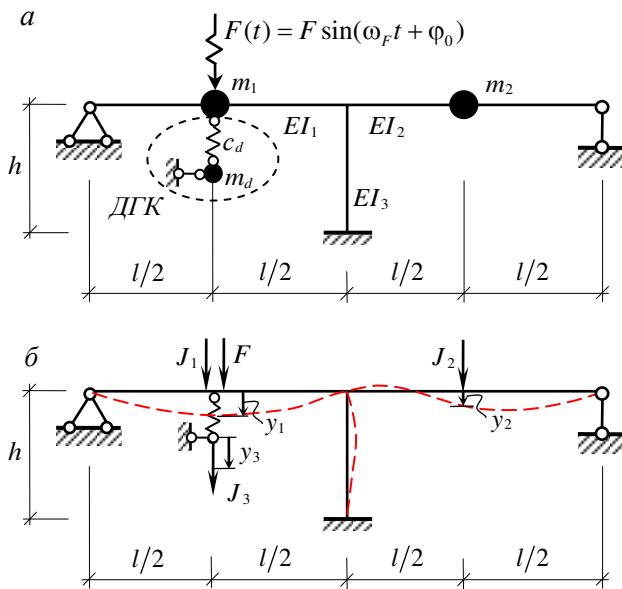


Рис. 4. Схема стержневой системы с гасителем (*a*), расчетная модель системы (*b*) при амплитудном отклонении

Уравнения установившихся вынужденных колебаний системы с ДГК в амплитудах перемещений масс:

$$\begin{pmatrix} r_{11}^* & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22}^* & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33}^* \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{1F} \\ R_{2F} \\ R_{3F} \end{pmatrix} = 0, \quad (5)$$

где $r_{11}^* = r_{11} - m_1 \omega_F^2$; $r_{22}^* = r_{22} - m_2 \omega_F^2$; $r_{12} = r_{21}$; $r_{23} = r_{32} = 0$;
 $r_{13} = r_{31} = -c_d$; $r_{33}^* = c_d - m_d \Omega_F^2$; y_1, y_2, y_3 – перемещения масс; $R_{1F} = -F$; $R_{2F} = R_{3F} = 0$.

Используя в описаниях характеристик НДС системы, входящих в требования работоспособности конструкции (по прочности, устойчивости, жесткости и др.), соответствующие динамические коэффициенты μ_{dyn} , вводим для них ограничения в форме

$$\mu_{dyn} \leq [\mu], \quad (6)$$

где $[\mu]$ – предельно допустимое значение.

Для рассматриваемой системы (рис. 4) приняты следующие соотношения расчетных параметров: $EI_1 = 2EI$; $EI_2 = EI$; $EI_3 = 4EI$; $m_1 = m$; $m_2 = 0,5m$; $h = 0,5l$. При этих данных отношение частот собственных колебаний незащищенной системы $\omega_2^0/\omega_1^0 \approx 1,081$. Частота внешнего воздействия, на которую настраивается гаситель, – близкая к минимальной собственной частоте ω_1^0 : $\omega_F = k_{\omega F} \cdot \omega_1^0$ ($k_{\omega F} = 0,8...0,95$), когда применение гасителя целесообразно.

Массу гасителя необходимо назначать, учитывая технические особенности его работы. Согласно условию (4) малая масса гасителя m_d требует его малой жесткости c_d , вследствие чего перемещения массы гасителя могут быть значительными и технически неприемлемыми. Рис. 5 показывает изменение МО динамического коэффициента по изгибающему моменту в сечении 1 (в месте расположения m_1) в зависимости от МО рабочей частоты внешнего воздействия.

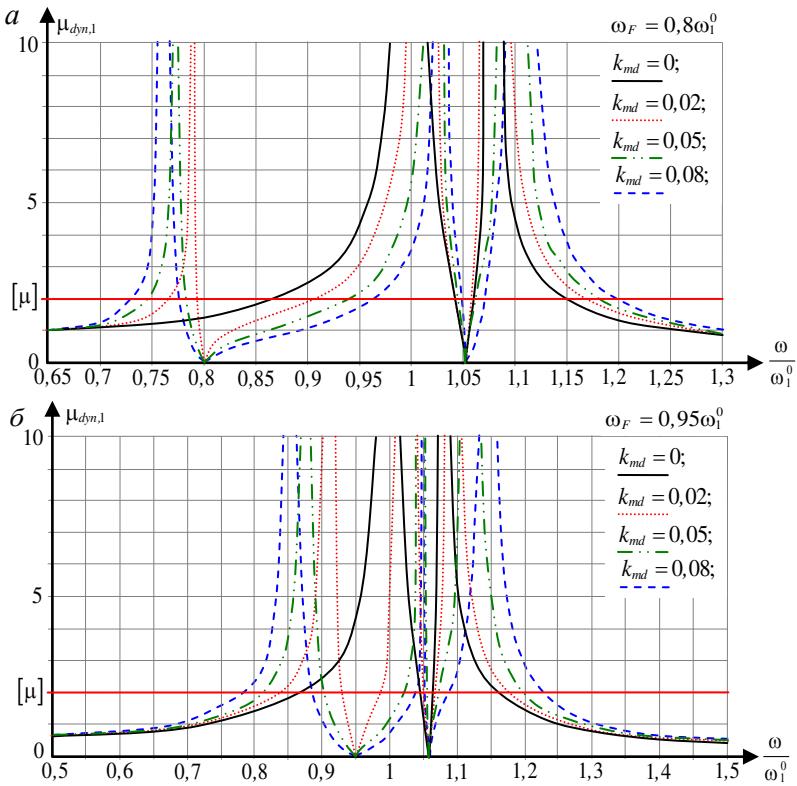


Рис. 5. Динамический коэффициент по изгибающему моменту в сечении 1 в зависимости от рабочей частоты при разных массах ДГК: $k_{\omega F} = 0,8$ (а); $k_{\omega F} = 0,95$ (б)

Приведены графики для незащищенной системы ($k_{md} = 0$) и системы с ДГК при разных $k_{md} \neq 0$. Увеличение массы гасителя приводит к повышению его эффективности (расширению диапазона допустимых рабочих частот). Экономически целесообразно, в зависимости от технических особенностей ГК, применять гасители с относительной массой, как правило, до 5 % от общей массы системы¹.

¹ Рекомендации ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко по проектированию гасителей колебаний для защиты зданий и сооружений, подверженных горизонтальным динамическим воздействиям от технологического оборудования и ветра. М.: Стройиздат, 1978. 67 с.

На рис. 6 представлены графики МО и границ доверительного интервала значений (ДИЗ) динамического коэффициента, определенного по «правилу трех стандартов», в зависимости от частоты воздействия ω . Фрагмент A дополнительно иллюстрирует связь границ доверительной области значений величин k_{ω} и μ с их распределениями $p_{k\omega}(k_{\omega})$ и $p_{\mu}(\mu)$.

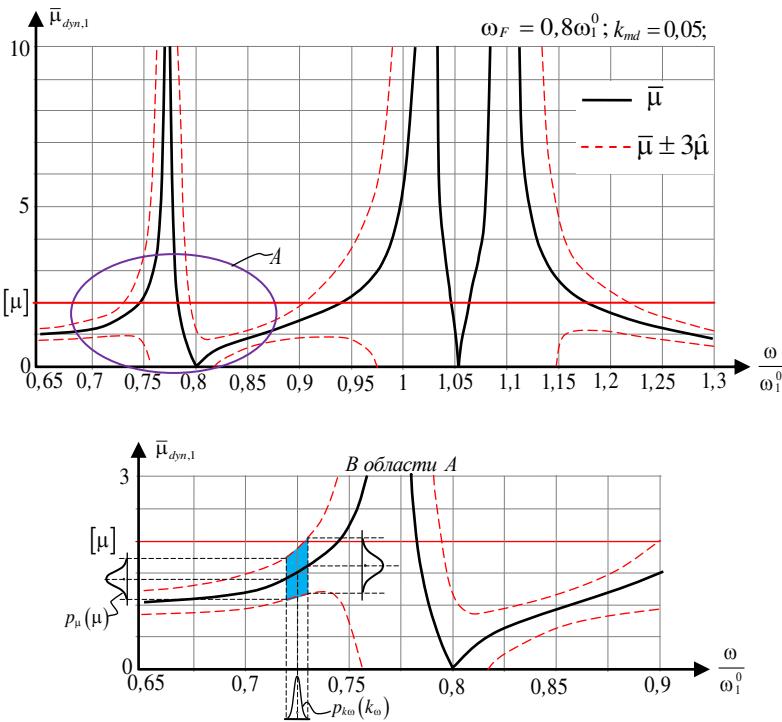


Рис. 6. Доверительные интервалы и МО динамического коэффициента $\bar{\mu}_{dyn,1}$ по изгибающему моменту в сечении 1 в зависимости от частоты ($k_{\omega F} = 0,8$; $k_{md} = 0,05$)

Для определения надежности применена методика А.Р. Ржаницына [9, 10, 11], с использованием понятия резерва обобщенной прочности $\tilde{S} = \tilde{R} - \tilde{Q}$ (здесь и далее символом « $\tilde{}$ »

обозначается случайная величина). Условие безотказности, по которому оценивается надежность, в общем виде записывается как

$$\tilde{Q} \leq \tilde{R} \quad \text{или} \quad \tilde{S} \geq 0, \quad (7)$$

где за обобщенный нагрузочный фактор \tilde{Q} в данной задаче принят динамический коэффициент по изгибающему моменту в месте крепления гасителя ($\tilde{Q} = \tilde{\mu}_{dyn}$ – по результатам вероятностного расчета); обобщенная прочность $\tilde{R} = [\mu]$ – максимально допустимое значение динамического коэффициента.

В качестве $[\mu]$ для количественной оценки влияния гасителя на надежность системы можно использовать значение динамического коэффициента для незащищенной системы (в расчетах принято $[\mu] = 2$). При иных требованиях безотказности надежность можно оценивать и по другим критериям, например по ограничению перемещений [12], долговечности [13] и др. [14]. Если требуется определить надежность многоэлементной системы, то рационально использовать методику, изложенную в [15].

Вероятностные характеристики динамического коэффициента $\tilde{\mu}_{dyn}$ – математическое ожидание $\bar{\mu}_{dyn}$ и стандарт $\hat{\mu}_{dyn}$ ² – вычисляются по известным описаниям расчетных параметров системы и нагрузки, причем $\hat{\mu}_{dyn}$ при некоррелированных параметрах находится по методу статистической линеаризации с численным определением частных производных:

$$\tilde{\mu}_{dyn} = \frac{\tilde{M}_{dyn}}{\tilde{M}_{st}}; \quad \bar{\mu}_{dyn} = \frac{\bar{M}_{dyn}}{\bar{M}_{st}}; \quad \hat{\mu}_{dyn} = \hat{Q} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_x} \left[\left(\frac{\partial \mu_{dyn}}{\partial x_i} \right) \Big|_{x=\bar{x}} \cdot \hat{x}_i \right]^2}. \quad (8)$$

² Символами « $\bar{}$ » и « $\hat{}$ » здесь и далее обозначены математические ожидания и стандарты случайных величин.

В предположении о нормальном распределении резерва обобщенной прочности $p_s(S)$ вероятность отказа P_f можно определять, используя характеристику безопасности

$$\beta_s = \frac{\bar{S}}{\hat{S}} = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\hat{R}^2 + \hat{Q}^2}} = \frac{[\mu] - \bar{\mu}_{dyn}}{\hat{\mu}_{dyn}} \quad (9)$$

и функцию Лапласа:

$$P_f = P(S < 0) = 0,5 - \Phi_0(\beta_s). \quad (10)$$

Количественные результаты расчетов надежности в виде графиков вероятности отказа незащищенной и защищенной систем, в зависимости от МО частоты рабочей нагрузки, представленных на рис. 7, получены при следующих вероятностных характеристиках основных расчетных параметров:

$$\begin{aligned} \text{– МО: } \bar{EI}_1 &= 2\bar{EI}; \quad \bar{EI}_2 = \bar{EI}; \quad \bar{EI}_3 = 4\bar{EI}; \quad \bar{F} = 0,5\bar{F}_{st}; \\ \bar{F}_{st} &= \bar{m}_1 g; \quad \bar{m}_2 = k_m \bar{m}_1 (k_m = 0,5); \quad \bar{m}_d = k_{md} \bar{m}_1 (k_{md} = 0,02; 0,05; 0,08); \\ \bar{c}_d &\text{ – по (4); } \bar{h} = 0,5\bar{l}; \end{aligned}$$

– коэффициенты вариации: $A_m = 0,02$; $A_{md} = 0,025$; $A_{cd} = 0,02$; $A_{\omega F} = 0,01$; $A_l = A_h = 0,008$; $A_{EI} = 0,02$.

На рис. 7, а, б в интервале значений рабочей частоты (в областях А, Б), обозначенном как $[\Delta\omega_F]$, вероятность отказа P_f для незащищенной системы ($k_{md} = 0$) неприемлемо высока ($> 0,5$), а для системы с гасителем $P_f < 10^{-6}$ при $k_{md} \geq 0,05$. Если $k_{md} < 0,05$, то вероятности отказа в интервале частот $[\Delta\omega_F]$ превышают 10^{-6} и могут достигать недопустимых значений, например при $k_{md} = 0,02$ (см. рис. 7, а, б). Следовательно, с точки зрения надежности, чем ближе рабочая частота к резонансной, тем массивней целесообразно назначать гаситель³.

³ Снижение вероятности отказа возможно также за счет уменьшения вариативности расчетных параметров системы и гасителя, но технически это реализуется сложнее, а в отношении динамических воздействий, как правило, невозможно.

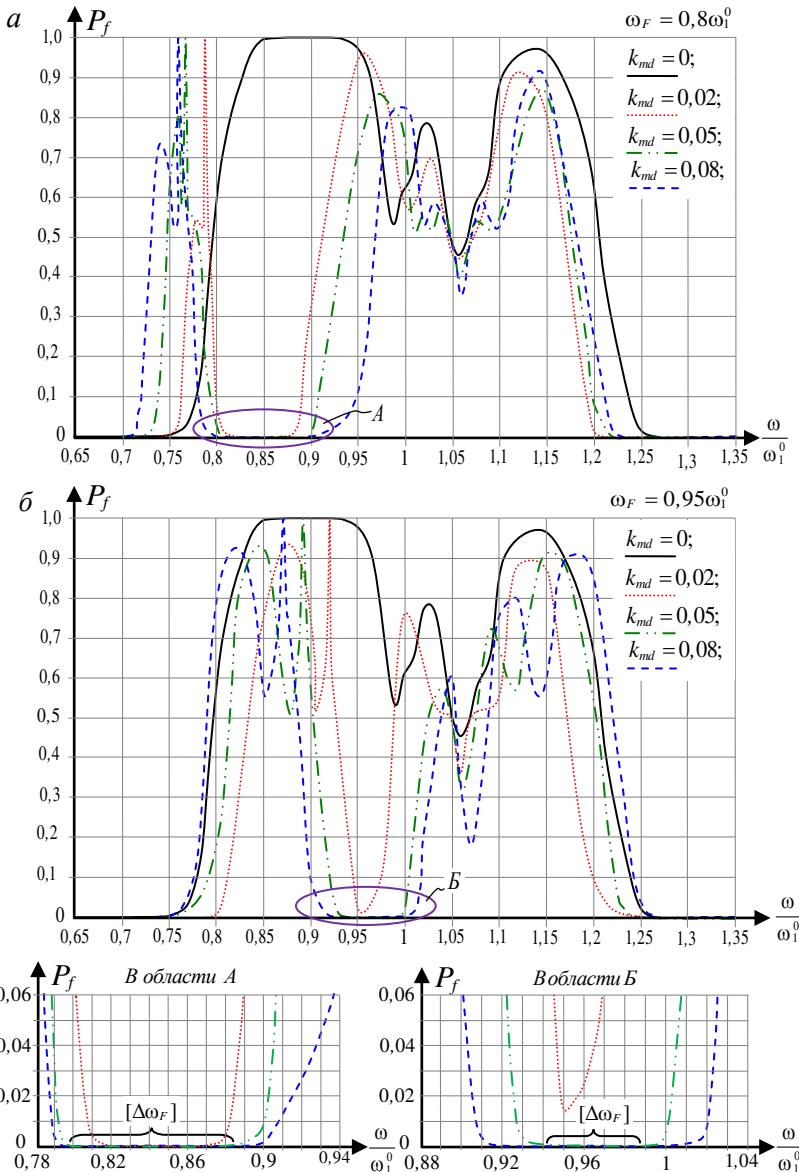


Рис. 7. Вероятность отказа в зависимости от рабочей частоты при разных массах ДГК: $k_{\omega F} = 0,8$ (а); $k_{\omega F} = 0,95$ (б)

Полученные качественные оценки и количественные результаты решения модельных задач свидетельствуют о том, что стохастическая изменчивость параметров гасителя колебаний для систем с некоторыми близкими собственными частотами ухудшает показатели надежности при рабочих частотах воздействий, приближающихся к резонансным, в сравнении с системами, имеющими разреженные спектры собственных колебаний.

Выводы

1. Кривая вероятности отказа незащищенной системы со сгущенным спектром собственных частот, по сравнению с системой с разреженным спектром характеризуется большими градиентами.
2. В защищенной системе со сгущенным спектром собственных частот вероятность отказа в области второй и третьей частот, за счет их сближения, достигает недопустимо больших значений.
3. При наличии зон сгущения в спектре собственных частот область недопустимых по требуемой надежности значений рабочей частоты воздействия расширяется, что обуславливает необходимость повышения требований к стабильности рабочей частоты и качеству исполнения гасителя по массе и жесткости.
4. Применение правильно выбранного ГК улучшает динамическое состояние системы по сравнению с незащищенной, и соответственно количественные показатели надежности. С увеличением массы ГК диапазон допустимых рабочих частот расширяется, при этом надежность системы возрастает.

Список литературы

1. Коренев, Б. Г. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения / Б. Г. Коренев, Л. М. Резников. – Москва : Наука, 1988. – 304 с.
2. Дукарт, А. В. Динамические гасители колебаний конструкций / А. В. Дукарт, А. И. Олейник. – Москва : АСВ, 2015. – 248 с.

3. Гербер, Ю. А. Особенности расчета надежности динамически нагруженных систем с учетом эффекта нелинейности амплитудно-частотных характеристик в резонансных зонах / Ю. А. Гербер, В. Г. Себешев // Известия вузов. Строительство. – 2017. – № 5. – С. 5–16.
4. Vrouwenvelder, T. Treatment of risk and reliability in the Eurocodes // Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings. – 2008. – Vol. 161. – Issue SB4. – P. 209–214.
5. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений / А. Ф. Смирнов, А. В. Александров, Б. Я. Лашеников, Н. Н. Шапошников. – Москва : Стройиздат, 1984. – 416 с.
6. Buchholdt, H. A. Structural Dynamics for Engineers / H. A. Buchholdt, S. E. Moossavi Nejad. – Second edition. – London : ICE Publishing, 2012. – 318 p.
7. Chopra, A. K. Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering / A. K. Chopra. – Third Edition. – New Jersey : Upper Saddle River, 2007. – 876 p.
8. Игнатьев, В. А. Редукционные методы расчета в статике и динамике пластинчатых систем / В. А. Игнатьев. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1992. – 144 с.
9. Ржаницын, А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А. Р. Ржаницын. – Москва : Стройиздат, 1978. – 239 с.
10. Райзер, В. Д. Теория надежности сооружений / В. Д. Райзер. – Москва : АСВ, 2010. – 384 с.
11. Dan, M. Frangopol. Reliability and Optimization of Structural Systems: Assessment, Design and Life-Cycle Performance / Frangopol Dan M., Kawatani Mitsuo, Kim Chul-Woo. – London : Taylor & Francis Group, 2007. – 269 p.
12. Себешев, В. Г. Анализ влияния стохастической изменчивости параметров конструкций с динамическими гасителями колебаний на надежность при гармонических нагрузках / В. Г. Себешев, Ю. А. Гербер // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 4. – С. 93–105.

13. Себешев, В. Г. Оценка надежности и долговечности по условию усталостной прочности стержневых систем с динамическим гасителем колебаний при гармонических воздействиях / В. Г. Себешев, Ю. А. Гербер // Проблемы оптимального проектирования сооружений : доклады 3-й Всероссийской конференции. – Новосибирск, 15–17 апреля, 2014 г. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2014. – С. 367–380.
14. Себешев, В. Г. Расчет надежности сооружений и конструкций по поликритериальным и обобщенным условиям безотказности / В. Г. Себешев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – Т. 14, вып. 1. – 2017. – С. 165–174.
15. Себешев, В. Г. Расчет надежности сооружений и конструкций по обобщенным характеристикам и условиям безотказности / В. Г. Себешев // Известия вузов. Строительство. – 2016. – № 6. – С. 13–31.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

Н.В. Светышев^{*}, В.В. Герасимов^{}**

Разработаны основы организационной надежности системы объектов строительства на основе системного связывания локальных надежностей в комплексе надежности объектов. Основой подхода является проектирования потока объектов и надежностей в рамках сетевой модели, регулирование которой позволяет осуществлять изменения параметров для рационального использования резервов управления по отклонениям. Эффективность решения комплексирования объектов обеспечивается за счет управления факторами надежности в пределах установленных экономических нормативов и инженерных правил. Использование модельного комплекса управления позволяет формировать достоверные решения документов развития комплексов строительного кластера.

Ключевые слова: методология, инженерное конструирование, менеджмент, эффективные решения.

Введение

Методологические основы системотехники и эффективной организации и управления строительным производством разработаны в работах [1–4].

Необходимость развития в строительстве новых методов и подходов системотехники вызвана все большим повышением сложности проектирования, создания строительных систем,

Понятие «системотехника» (Systems Engineering) обычно наполняется разным смыслом, имеет много определений и значений: научно-практическая дисциплина, область науки, направление в кибернетике, комплекс особых теоретических и практических вопросов, общая техническая наука о больших

^{*} Аспирант кафедры технологии и организации строительства НГАСУ (Сибстрин)

^{**} Д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и организации строительства НГАСУ (Сибстрин)

системах, методология проектирования и конструирования больших систем, специальность инженерного образования, характеристика особой инженерной деятельности, образ действия, направление мышления, мировоззрение инженера и исследователя. В целом они не противоречат, а лишь дополняют и расширяют друг друга.

Под системотехникой строительства понимается научно-техническая дисциплина, охватывающая комплексно и во взаимосвязи стыковые вопросы проектирования, создания, функционирования и развития строительных систем, т.е. систем, сформированных для достижения определенного результата в строительстве. Системообразующим фактором функционально-системного принципа является конкретный результат функционирования системы, тогда система – это комплекс избирательно вовлеченных элементов, взаимодействующих достижению заданного результата.

В строительных системах сложность иерархии, множество целей, несоподчиненность и ненадежность критериев по отдельным подсистемам делают весьма актуальной методологию обеспечения в процессе моделирования достоверности и надежности достижения конечного результата.

При моделировании сложных систем в связи с неизбежным компромиссом между простотой модели и сложностью моделируемых объектов значительные методологические трудности представляют оценки адекватности модели реальной действительности. Теория функциональных систем позволяет произвести оценку адекватности модели по степени отражения результата функционирования системы.

Целью работы является исследование методологии разработки системотехники инженерного менеджмента, в рамках которой осуществляется динамический процесс формирования процессов, структур и механизмов системы строительного производства на основе знаниевых технологий их эффективного использования.

Актуальность темы обусловлена необходимостью разработки нормативно-методической базы организационных решений в строительстве с учетом факторов риска.

Методика исследований

Исследование модели организационной надежности строительства объектов включало задачи моделирования системы безопасности строительства объектов, потоковых динамических систем, информационного программирования надежности строительных объектов. В качестве инструментов исследований принимался комплекс методов информационного программирования, включающий гипертекстовое моделирование, системотехнический анализ, многопараметрический анализ.

Исследование организационной надежности организационных решений проведено в соответствии с методологией, предусматривающей два этапа: формирование нормативов параметров организационных решений с учетом отклонений выполнения работ; формирование факторных зависимостей влияния отклонений на организационную безопасность проектных решений [1–4]. В качестве инструмента первого этапа принята модель надежности производительности потока вида.

Анализ модели показывает, что в формировании и изменении производительности строительных потоков участвуют следующие составляющие:

- изменение затрат в зависимости от внешних и внутренних факторов производства работ;
- изменение продолжительности в зависимости от внешних и внутренних факторов производства работ;
- оценки вероятностей появления отклонений фактических от нормативных значений параметров затрат и продолжительности работ;
- оценки надежности величины отклонений фактических от нормативных значений параметров затрат и продолжительности работ в соответствии с максимальной вероятностью их появления.

В соответствии с этим в качестве основных параметров исследований приняты затраты и продолжительность, а оценок отклонений – вероятность и надежность их в объекте.

В качестве инструмента второго этапа принята модель области организационной безопасности, характеризуемая уровнем надежности потоковой системы вида:

$$Коб = \frac{Ндφ}{Ндр}; \quad (1)$$

$$Ндр = Ндн \times Кун; \quad (2)$$

$$Коб1: (\mathcal{E} < \mathcal{E}1); \quad (3)$$

$$Коб2: (\mathcal{E} = I); \quad (4)$$

$$Коб3: (\mathcal{E} > I), \quad (5)$$

где $Коб$ – коэффициент организационной безопасности; $Ндφ$, $Ндр$, \mathcal{E} – эффективность; $Ндн$ – надежность фактическая, расчетная, нормативная соответственно; $Кун$ – коэффициент улучшения надежности; $Коб1 < 1$, $Коб2 = 1$, $Коб3 > 1$ – область допустимой, предельной, критической безопасности соответственно.

Структура потоковой системы имеет вид:

- по этапам жизненного цикла продукции

$$З(TCC)_{n-4} = Зt1 + Зt2 + Зt3 + Зt4, \quad (6)$$

где $З(TCC)$ – затраты TCC ; $Зt1$, $Зt2$, $Зt3$, $Зt4$ – соответственно затраты первого, второго, третьего, четвертого этапов комплексного строительного процесса;

- по уровням системы

$$З(TCC) = З(UKл, UTnn, UTcp), \quad (7)$$

где $UKл$, $UTnn$, $UTcp$ – соответственно множество кластеров, множество типов производства, множество типов строительных работ;

- по технологиям строительства

$$З(TCC) = З(BPmcc, Brkl, BPnn, Bpcp), \quad (8)$$

где $BPMcc$, $Brkl$, $BPnn$, $Bpcp$ – соответственно виды работ системы, кластеров, производств, строительных работ.

Эти оценки определяют количественные (как величины отклонений) и качественные (как уровни состояния потенциала организации) характеристики соответственно.

Приведенная схема определяется следующими положениями:

- по этапам жизненного цикла создается многоэтапная технология продвижения во времени структурных элементов системы;
- структурными элементами системы создается ресурсная составляющая структурных элементов системы;
- технологиями строительных работ создается вектор квантов ресурсов, ориентированный на результат с нормативным уровнем надежности.

Системная значимость этих моделей определена возможностью проектирования ресурсных квантов, которые поддерживаются логистическими, производственными и строительным потенциалами ТСС, ориентированными на результат.

Исследование промышленной логистики включает следующие положения.

Информационная модель имеет вид:

$$H(lm) = \{(Z_{pk}, Z_{tr}, Z_{sk}, Z_{dc}), (t_{pk}, t_{tr}, t_{sk}, t_{dc})\}, \quad (9)$$

где $H(lm)$ – параметры для исследования надежности блока промышленной логистики; Z_{pk} , Z_{tr} , Z_{sk} , Z_{dc} – затраты покупки материалов, транспорта, складирования, доставка материалов производству соответственно; t – продолжительность работ.

Алгоритм исследования содержит следующие положения:

- разработка шаблона вида «клuster–тип производства – тип мероприятий – множество отклонений»;
- имитационное моделирование ситуаций по отклонениям параметров;
- вычисление базового модуля надежности $B = f(\Delta)$;
- проверка уравнений модуля на достоверность;
- формирование расчетных модулей надежности промышленной логистики в рамках жизненного цикла продукции ТСС.

Уравнения регрессии $B = f(\Delta)$ имеет вид:

$$Y(B)_{пл} = a + b \times X(\Delta) - c \times X(\Delta)^2, \quad (10)$$

где $Y(B)_{пл}$ – функция вероятности; a, b, c – коэффициенты регрессии; X – фактор отклонений параметров.

Результаты исследований

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что затраты и продолжительность выполнения технологии существенно зависят от интенсивности выполняемых работ, а их технологичность определяется величиной отклонений от средней интенсивности технологического процесса. На примере механизированных работ удельное значение соответствует изменению затрат на 3–5 %, продолжительности – на 3–7 %.

Технологическая надежность определяется предельными значениями отклонений технологичности, соответствующими величине приращенных затрат, равной нормативной прибыли строительного проекта.

Формирование технологического комплекта основано на вариантом проектировании и определяется организационной структурой потоков.

Организационная надежность определяется предельными значениями отклонений структурности, соответствующими величине приращения затрат, равной нормативной прибыли строительного проекта.

Информационное программирование организационно-технологических процессов обеспечивает возможность осуществления целенаправленных проектных процессов поиска оптимальных параметров, индикативного планирования характеристик организационно-технологических решений и последующего использования в процедуре реализации строительного проекта.

Использование системных блоков организационно-технологической надежности позволяет сформировать специализированную функцию проектирования по контроллингу проектных организационно-технологических решений строительного проекта.

Согласование с известными данными

Результаты исследований надежности организационных решений строительных объектов являются развитием существующих основ теории системотехники сложных систем и дополнено развитием знаний в области методических основ динамики потоковых процессов организационных модулей [4].

Заключение

Базовые значения надежности могут быть определены статистическим методами имитационного моделирования, в которых модуль «вероятность – отклонение» может быть принят за базовое значение надежности системы.

Организационно-технологическая надежность может служить основой для нормирования стохастических нормативов при разработке стохастических проектов организации строительства (ПОС) планов и бюджетов строительства объектов.

Эффективность учета нормативов надежности определяется возможностью управления отклонениями, вызывающими вероятностным характером производственных факторов.

Список литературы

1. *Системотехника строительства*: энциклопедический словарь / под ред. А. А. Гусакова. – Москва, 1999. – 432 с.
2. Швецов, В. А. Организационно-технологические условия и факторы управления региональным комплексом инвестиционно-зависимых отраслей / В. А. Швецов // Известия КГАСУ. – 2005. – № 1 (3). – С. 98–101.
3. Организационная надежность производственно-логистических проектов строительных объектов / В. В. Герасимов, О. А. Коробова, А. В. Левченко, Г. Б. Сафарян // Экономика и организационно-управленческие проблемы развития строительного комплекса России : сб. науч. трудов Всесоюзной конференции. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2014. – С. 34–39.
4. Романова, А. И. Методология комплексного подхода к решению проблемы устойчивого экономического развития инвестиционно-строительного комплекса / А. И. Романова // Известия КГАСУ. – 2005. – № 1 (3). – С. 105–107.

ОЦЕНКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

П.А. Унижонный*, А.Б. Виноградов**

Предложено производить оценку альтернативных технологических процессов строительства по критериям качества с использованием ориентированного плоского орграфа. Сравнение процессов производится с использованием показателя вершинной достижимости. Описание орграфа выполнено с помощью симметричной квадратной матрицы смежности. Приведены результаты исследования оценки применяемым в настоящее время технологическим процессам строительства подземных паркингов. Для каждого процесса рассчитан коэффициент предпочтительности, построен кортеж предпочтительности, выбран доминирующий.

Ключевые слова: технология строительства, подземное строительство, орграф.

Введение

Подземная урбанизация интенсивно развивается во всем мире. Однако в отличие от зарубежных стран, где для обеспечения устойчивого равновесия и комфортного проживания в мегаполисе доля подземных сооружений составляет 20–25 % от общей площади вводимых объектов, в России и странах ближнего зарубежья эта цифра не достигает 10 % даже в столицах. Интенсивность освоения подземного пространства зависит от многих факторов, одним из решающих является выбор технологического метода строительства. Применяют следующие технологии освоения подземного пространства [1–8]:

1. Устройство котлована из буронабивных свай с последующим монтажом стенок из сборных железобетонных панелей между сваями (по направляющим в сваях).

* Магистрант кафедры технологии и организации строительства НГАСУ (Сибстрин)

** Д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и организации строительства НГАСУ (Сибстрин)

2. Устройство стенок котлована из буронабивных свай с последующим бетонированием стенок торкретбетоном.
3. Метод опускного колодца.
4. Шпунтовое ограждение.
5. Метод «Стена в грунте»:
 - 5.1. Монолитная железобетонная стена в грунте.
 - 5.2. Стена из буросекущихся свай.
6. Метод замораживания грунта.
7. Технология «top-down».
8. Устройство открытого котлована (без крепления стенок).

Дальнейшее развитие строительной отрасли все настойчивее ставит технологам задачу совершенствования существующих технологических процессов и внедрения новых. Для этого на стадии проектирования строительного процесса последовательно осуществляются разработка технологических вариантов выполнения строительного процесса, принятие и разработка наиболее эффективного варианта по технологическим и технико-экономическим показателям.

Цель настоящего исследования – разработка методики определения прогрессивного технологического решения строительства, используя ориентированный орграф, проведение альтернативной оценки технологичности существующим методам строительства применительно для подземного паркинга.

Методика исследования

В соответствии с теорией графов [9–14] пусть M и N – два технологических метода устройства котлована. При их сравнении возможно одно из трех решений: метод M лучше метода N ; метод N лучше метода M ; различие между методами сделать затруднительно. В качестве объективного показателя, обеспечивающего принятие решения, целесообразно использовать соотношение

$$W^{MN} = \frac{(1 - P^{MN})\Phi^N}{(1 - P^{NM})\Phi^M}, \quad (1)$$

где P^{MN} и P^{NM} – вероятность риска соответственно от принятия первого и второго решения; Φ^M и Φ^N – степень прогрессивности технологических процессов N и M .

Если допустить, что степени прогрессивности обеих технологических процессов одинаковы, и в связи с тем, что свойство вероятностей противоположных событий $1 - P^{MN} = P^{NM}$ и $1 - P^{NM} = P^{MN}$ представляет вероятность превосходства качества технологического процесса N над M (и наоборот), при $W^{MN} < 1$ принимается первое решение, при $W^{MN} > 1$ – второе, а при $W^{MN} = 1$ – третье.

Следовательно, задача принятия решения сводится к тому, чтобы на основании данных о качестве двух технологических процессов определить величины Φ^M , Φ^N , P^{MN} , P^{NM} и затем вычислить показатель W^{MN} по формуле

$$W^{MN} = \frac{\left(a_1 \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n a_2 \right) \times \sum_{i=1}^n R_i^N \left| \sum_{i=1}^n m_i^M - \sum_{i=1}^n m_i^{HM} \right|}{\left(a_1 \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n a_3 \right) \times \sum_{i=1}^n R_i^M \left| \sum_{i=1}^n m_i^N - \sum_{i=1}^n m_i^{HN} \right|}, \quad (2)$$

$$\text{где } a_1 = \frac{2}{n(n-1)}; \quad a_2 = \frac{1}{\left(1 + \frac{1 - r_i^M}{1 - r_j^M} \right) \left(1 + \frac{r_i^M}{r_i^N} \right)};$$

$$a_3 = \frac{1}{\left(1 + \frac{1 - r_i^N}{1 - r_j^N} \right) \left(1 + \frac{r_i^N}{r_i^M} \right)}.$$

Обобщенный показатель, обеспечивающий принятие решения о превосходстве качества одного технологического процес-

са над другим, позволяет учитывать любое число свойств процессов и делать заключение на основе совокупности действительных показателей качества и их нормативных величин с учетом важности различных свойств и возникающего при этом риска.

Очевидно, что, если сравнивается качество более чем двух технологических процессов, то необходимо их попарное сравнение с вычислением показателя W для каждой пары. Конечные результаты в этом случае сводятся в матрицу $\vec{A} = \|\vec{a}_{ij}\|$, в которой элемент

$$\vec{a}_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } W_{ij} \geq 1; \\ 0, & \text{при } W_{ij} < 1; \\ 0, & \text{при } i = j. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $i = \bar{1}, \bar{k}$; $j = \bar{1}, \bar{k}$, k – количество сравниваемых технологических процессов.

Следовательно, матрица \vec{A} представляет собой матрицу смежности ориентированного графа \vec{G} .

Для упорядочения технологических процессов по критерию качества с использованием орграфа \vec{G} наиболее целесообразно воспользоваться одним из его инвариантов, а именно – показателем вершинной достижимости. Данный показатель отражает, насколько «быстро» можно из вершины i «попасть» (достигнуть) в вершину j (вершины j). Практически это соответствует тому, насколько альтернативы «удалены» по предпочтительности друг от друга. Поэтому, определив минимальные пути для каждой вершины орграфа, для каждой из них можно рассчитать коэффициент предпочтительности i -го технологического процесса по формуле

$$b_i = b_i^3 \lambda_i. \quad (4)$$

Величины b_i^3 и λ_i рассчитываются с помощью соотношений:

$$b_i^{\exists} = 1, \quad \text{при } \sum_{j=1}^k \vec{d}_{ij} = k - 1;$$

$$b_i^{\exists} = \frac{k-1}{\sum_{j=1}^k \vec{d}_{ij}}, \quad \text{при } \sum_{j=1}^k \vec{d}_{ij} > k - 1;$$

$$b_i^{\exists} = \frac{\sum_{j=1}^k \vec{d}_{ij}}{k-1}, \quad \text{при } \sum_{j=1}^k \vec{d}_{ij} < k - 1;$$

$$\lambda_i = 1 - \frac{k_{ni} - 1}{k - 1};$$

$$i = \bar{1}, \bar{k},$$

где \vec{d}_{ij} – элемент матрицы минимальных путей \vec{D} ; k_{ni} – количество нулей в i -й строке матрицы \vec{D} .

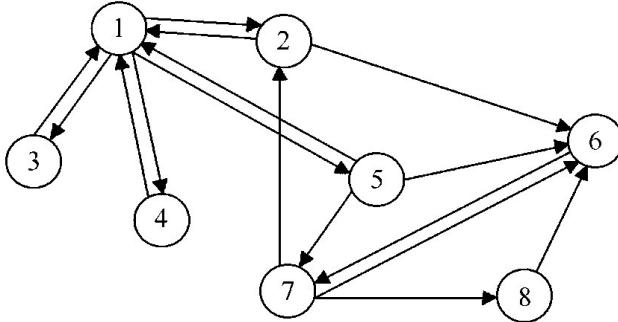
Отметим, что при $b_i^{\exists} = 1$ из i -й вершины выходят дуги ко всем остальным вершинам. Это означает полное доминирование i -й альтернативы над всеми остальными. При

$$b_i^{\exists} = \frac{k-1}{\sum_{j=1}^k \vec{d}_{ij}} \text{ или } b_i^{\exists} = \frac{\sum_{j=1}^k \vec{d}_{ij}}{k-1}$$

не исключается наличие длинных путей и отсутствие таковых вообще. Коэффициент λ_i учитывает возможность принципиальной достижимости вершин из вершины i -го процесса над всеми остальными.

Результаты расчетов

Для восьми сравниваемых методов строительства, указанных ранее, применительно для подземной парковки, орграф \vec{G} показан на рисунке.



Орграф доминирования технологических процессов

Тогда матрица \vec{A} (согласно рисунку) примет вид:

$$\vec{A} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

а матрица минимальных путей \vec{D} будет представлена следующим образом:

$$\vec{D} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 4 \\ 1 & 0 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 0 & 2 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 2 & 0 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 0 & 3 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 4 & 4 & 4 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 3 & 3 & 3 & 1 & 0 & 1 \\ 4 & 3 & 5 & 5 & 5 & 1 & 2 & 0 \end{vmatrix}.$$

Подстановкой данных матрицы \tilde{D} в уравнение (1) определяются коэффициенты предпочтительности исследованных технологических процессов (см. таблицу).

Коэффициенты предпочтительности вариантов

| Параметры | Технологические процессы | | | | | | | |
|-----------------------------------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Порядковый номер способа | | | | | | | | |
| Коэффициенты предпочтительности b_i^3 | 0,69 | 0,65 | 0,48 | 0,48 | 0,65 | 0,46 | 0,61 | 0,39 |

Таким образом, кортеж предпочтительности технологических процессов имеет вид: $1 > (2 \approx 5) > 7 > (3 \approx 4) > 6 > 8$. Следовательно, степень прогрессивности технологического процесса первого способа наивысшая. Под этим номером значится устройство котлована из буронабивных свай с последующим монтажом стенок из сборных железобетонных плит между сваями (по направляющим в сваях).

Материал данной статьи использован при выполнении магистерской диссертации [15].

Список литературы

1. *Лернер, В. Г. Систематизация и обоснование технологий строительства городских подземных сооружений : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. Г. Лернер. – Москва, 2000. – 179 с.*
2. *СП 43.1333.2012. Сооружения промышленных предприятий: актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85 (с изм. № 1) : введ. 01.01.2013 // Техэксперт. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [Электронный ресурс].*
3. *Современные технологии комплексного освоения подземного пространства мегаполисов / В. Н. Теличенко [и др.]. – Москва : АСВ, 2010. – 360 с.*

4. Конюхов, Д. С. Использование подземного пространства : учеб. пособие для вузов / Д. С. Конюхов. – Москва : Архитектура-С, 2004. – 296 с.
5. Раковицан, А. П. Проектирование железобетонных инженерных сооружений / А. П. Раковицан, В. Б. Сафонеев, В. П. Лисеев. – Киев, 1962. – 183 с.
6. Драновский, А. Н. Подземные сооружения в промышленном и гражданском строительстве / А. Н. Драновский, А. Б. Фадеев. – Казань, 1993. – 355 с.
7. Руководство по комплексному освоению подземного пространства крупных городов. – Москва, 2004. – 208 с.
8. Пономарев, А. Б. Подземное строительство : учеб. пособие / А. Б. Пономарев, Ю. Л. Винников. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 262 с.
9. Алескеров, Ф. Т. Бинарные отношения, графы и коллективные решения / Ф. Т. Алескеров, Э. Л. Хабина, Д. А. Шварц. – Москва : ГУВШЭ, 2006. – 298 с.
10. Бурков, В. Н. Теория графов в управлении организационными системами / В. Н. Бурков, Д. Ю. Заложнев, Д. А. Новиков. – Москва : Синтег, 2001. – 124 с.
11. Bramsen, P. J. Doing Time: Inducing Temporal Graphs : Technical report / P. J. Bramsen ; Massachusetts Institute of Technology. – Massachusetts, 2006.
12. Kokhov, V. A. Integrated research environment «Graph Model Workshop» / V. A. Kokhov, A. A. Neznanov, S. V. Tkachenko // Fourth conceptual structures tool interoperability workshop (CS-TIW'09). – Moscow, 2009. – P. 7–12.
13. Кохов, В. А. Концептуальные и математические модели сложности графов : учеб. пособие / В. А. Кохов. – Москва : МЭИ, 2002. – 160 с.
14. Белов, В. В. Теория графов : учеб. пособие для вузов / В. В. Белов, Е. М. Воробьев, В. Е. Шаталов. – Москва : Высшая школа, 1976. – 392 с.
15. Унижонный, П. А. Технология строительства подземного многоуровневого паркинга за Оперным театром г. Новосибирска : магистр. дис. ... / П. А. Унижонный. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2017. – 114 с.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 693.547.32

МИГРАЦИЯ ВЛАГИ ПРИ БЕТОНИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИЙ НА МЕРЗЛОМ БЕТОННОМ ОСНОВАНИИ

Д.А. Иванов^{*}, В.В. Молодин^{}**

Представлены теоретические и экспериментальные исследования процесса внутреннего массопереноса и степени его влияния на прочность в твердеющем бетоне каркасных конструкций, бетонируемых на мерзлом основании.

Ключевые слова: массоперенос, миграция влаги, переувлажнение бетона, мерзлое основание, стык.

Введение

При бетонировании конструкций в зимних условиях непосредственно на строительных объектах неизбежны технологические перерывы, вызванные окончанием смены, неритмичной поставкой бетона, установкой опалубки и арматуры. При возобновлении бетонирования на контакте «старого» охлажденного бетона с «новым» появляется значительный температурный градиент, под действием которого формируется градиент влажности. Влага мигрирует по порам и капиллярам из теплых в более холодные слои бетона за счет возникновения пониженного парциального давления в зонах низких температур [1, 2].

Перенос влаги в холодную зону приводит там к ее избытку. Нарушается равномерное распределение влаги по конструкции

^{*} Магистрант кафедры технологии и организации строительства НГАСУ (Сибстрин)

^{**} Д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и организации строительства НГАСУ (Сибстрин)

и, следовательно, увеличивается водоцементное отношение в охлажденных зонах. Это приводит к уменьшению плотности, увеличению пористости и ухудшению качества бетона [3].

Появление переувлажненных слоев бетона в местах контакта конструкций усугубляет ситуацию и может привести к опасным последствиям [4]. При этом происходит увеличение адгезии за счет растворенного вяжущего в проникающей воде [5], что является положительным фактором. На сегодняшний день нормативные и технические документы при проектировании технологии зимнего бетонирования в полной мере не учитывают процессы внутреннего массопереноса в бетоне. Распределение влажности принимается равномерным, без учета возможного появления переувлажненных слоев монолитных конструкций. Следовательно, в твердеющем бетоне при наличии значительного температурного градиента миграция влаги может привести к аварийной ситуации.

Цель работы: исследование процесса внутреннего массопереноса и степени его влияния на прочность в твердеющем бетоне каркасных конструкций, бетонируемых на мерзлом основании по традиционной технологии – с обогревом твердеющего бетона греющим проводом.

Задачи исследования

1. Провести опытное бетонирование каркасной конструкции в лабораторных условиях, имитирующих бетонирование колонны на промороженном перекрытии в условиях строительной площадки.

2. Исследовать миграционные процессы, формирующиеся в твердеющем бетоне конструкции, бетонируемой с электрическим обогревом на мерзлом основании, и установить их влияние на прочность бетона в зоне контакта.

Методика проведения эксперимента

В ходе эксперимента по исследованию процесса переноса влаги был собран фрагмент монолитной колонны, бетонируемой на промерзшей плите перекрытия. Для оптимизации эксперимента было принято решение о применении условий симмет-

ричной тепловой задачи – бетонировать половину колонны на половине перекрытия. Условие тепловой симметрии выполнялось качественным утеплением со стороны отсутствующей части конструкции (рис. 1).



Рис. 1. Модель фрагмента колонны, бетонируемой на мерзлом перекрытии: а – общий вид модели; б – монтаж термо- и кондуктометрических створов

В качестве перекрытия использовался блок из тяжелого бетона класса В15 размером $0,5 \times 0,5 \times 0,3$ м. Для бетонирования колонны сечением $0,4 \times 0,4$ м, исходя из условия тепловой симметрии, была изготовлена деревянная опалубка высотой 0,5 м, сечением $0,4 \times 0,2$ м. На тыльной стороне фрагмента колонны и основания был установлен утеплитель толщиной 15 см. Для имитации реального бетонирования конструкции в колонне были смонтированы арматурные стержни. На арматурный каркас с шагом 50 мм навивался греющий провод ПНСВ-2 диаметром 2 мм (рис. 2), на который подавался переменный электрический ток 16 А, напряжением 0,8 В, что позволяло в объеме бетона $0,04 \text{ м}^3$ выделять мощность 12,8 Вт.

Температура воздуха в сертифицированной климатической камере во время охлаждения основания и в процессе выдерживания составляла -30°C .

В качестве датчиков температуры использовались хромель-кобальтовые термопары, показания которых снимались с помощью многоканального измерителя температуры Термодат-22М5, подключенного к персональному компьютеру, и программного обеспечения TermodatTools.

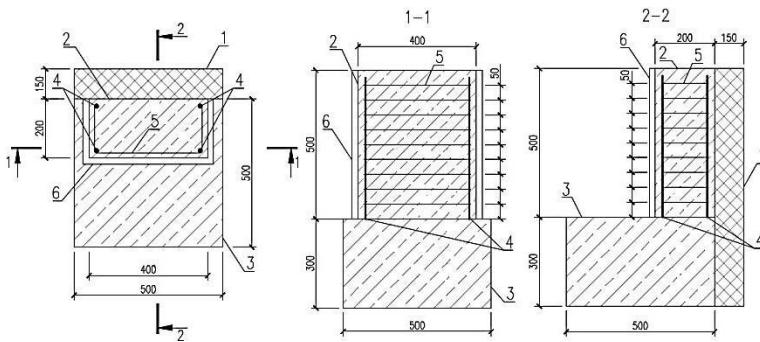


Рис. 2. Схема фрагмента колонны и основания:
1 – утеплитель; 2 – колонна; 3 – основание; 4 – арматурные стержни;
5 – греющий провод; 6 – опалубка

Определение влажности бетона должно определяться по стандартной методике [6]. Однако ее применение к поставленной задаче невозможно. Поэтому для определения влажностного поля и характера его изменения в твердеющем бетоне использовали электрические свойства бетона, так как непосредственное определение количественных или качественных значений влажности в толще бетонной конструкции весьма затруднительно. Широкое распространение получили методы, позволяющие оценить влажность материала посредством определения его электрических характеристик, в частности кондуктометрический [7]. Процесс миграции влаги исследовали при помощи измерения электрического сопротивления бетона посредством датчиков (рис. 3), изготовленных из двухжильного медного провода ПРППМ (ВМ) $2 \times 0,9$, диаметром 0,9 мм и расстоянием между жилами 3,5 мм. Датчики были установлены в центре и на периферии конструкции по всей ее высоте (рис. 4, линии А и В), показания снимались с помощью универсального цифрового

вольтметра В7-38, имеющего функцию измерения электрического сопротивления.

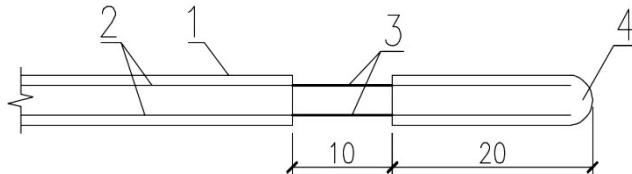


Рис. 3. Конструкция датчика сопротивления:
1 – провод ПРППМ (ВМ) 2×0,9; 2 – изолированные медные жилы;
3 – медные жилы без изоляции (электроды); 4 – изоляция

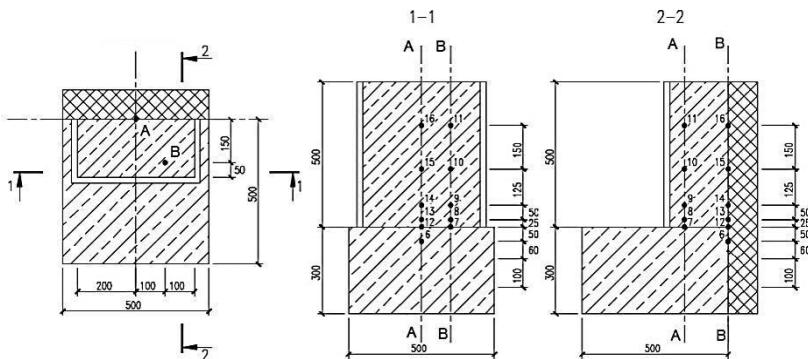


Рис. 4. Расположение датчиков влажности и линий их размещения (А, В) в бетоне экспериментальной конструкции

Перевод электрического сопротивления бетона в абсолютную влажность осуществлялся по зависимостям, предложенным В.Я. Гендиным, А.Д. Мягковым [8]:

$$W_{\text{абс}} = W_{\text{нач}} \cdot W_{\text{отн}}; \quad (1)$$

$$W_{\text{отн}} = \frac{R_{\text{нач}}}{R_{\text{эксп}} \cdot (1 + \beta \cdot (t_{\text{эксп}} - t_{\text{нач}}))}, \quad (2)$$

где $W_{\text{абс}}$ – абсолютная влажность, %; $W_{\text{нач}}$ – начальная влажность бетонной смеси, измеренная до начала эксперимента, %; $W_{\text{отн}}$ – относительная локальная влажность бетона по

сравнению с влажностью бетонной смеси в момент укладки, с учетом влияния температуры, %; $R_{\text{нач}}$ и $R_{\text{эксп}}$ – начальное и экспериментальное локальное сопротивление бетонной смеси, Ом; $t_{\text{нач}}$ и $t_{\text{эксп}}$ – начальная и экспериментальная температура бетона, °С; $\beta = 0,02$ – температурный коэффициент электрического сопротивления бетона, 1/°С.

Для учета большей проводимости жидкой фазы бетона на стадиях коллоидации и кристаллизации (примерно в 10 раз, чем на ранней стадии гидратации) при вычислении величины локальной влажности бетона вводился коэффициент $k = 10$ [8].

Начальная влажность бетона определялась термовесовым способом [6]. Показания датчиков электрического сопротивления и температуры снимались с интервалом 1 ч в течение первых 11 ч эксперимента, а затем через каждые 5 ч в течение следующих 75 ч. Общее время проведения эксперимента составило 86 ч.

Обсуждение результатов эксперимента

Системное измерение температуры и влажности твердеющего бетона фрагмента колонны, бетонируемой с обогревом твердеющего бетона греющим проводом на мерзлом бетонном основании, позволило выявить характер изменения полей влажности, формирующихся в конструкции под влиянием внешних факторов.

1. Начальный период выдерживания. Влажностное поле в бетоне фрагмента колонны в начальный момент времени было относительно равномерно (рис. 5–7), а именно:

- влажность на стыке в центре колонны имела наибольшее значение $\approx 3 \%$, и незначительно уменьшалась с высотой;
- на расстоянии между 25 и 75 мм от границы стыка $\approx 1–2 \%$;
- влажность среднего слоя $\approx 2,0–2,5 \%$;
- влажность верхнего слоя $\approx 1,5–2,5 \%$.

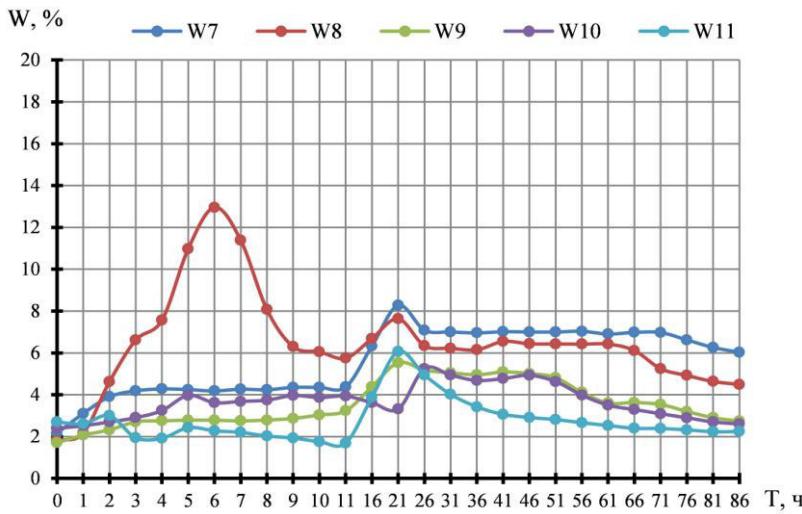


Рис. 5. Распределение влажности бетона по времени

в линии датчиков А:

W7–W11 – влажность в точках 7–11 (см. рис. 4)

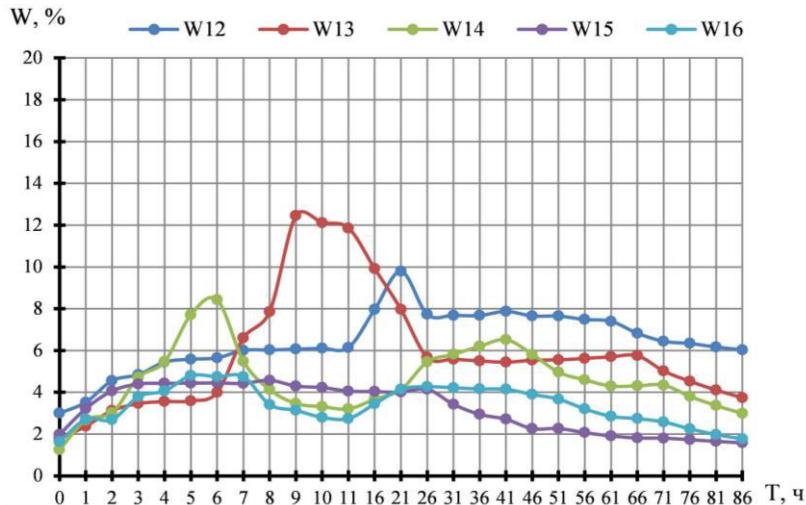


Рис. 6. Распределение влажности бетона по времени

в линии датчиков В:

W12–W16 – влажность в точках 12–16 (см. рис. 4)

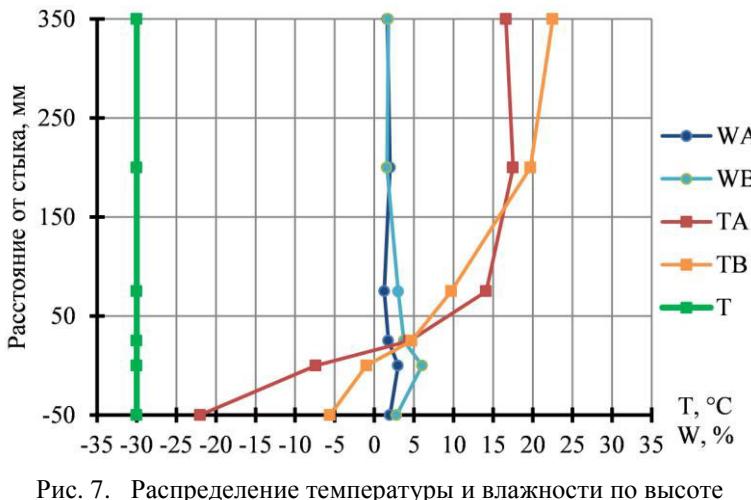


Рис. 7. Распределение температуры и влажности по высоте конструкции в начале эксперимента (0 ч):
 WA, WB, TA, TB – влажность и температура по линии датчиков А и В; Т – температура в климатической камере

Скорость изменения влажности в различные моменты времени и в различных сечениях колонны по высоте была не одинакова. Максимальное изменение (увеличение) влажности бетона за все время эксперимента наблюдалось через 6 ч в центре, и через 9–11 ч в периферии сечения колонны после укладки и начала термообработки на расстоянии от 25 до 75 мм высоты колонны от границы стыка. На стыке колонны с промерзшим основанием и на высоте колонны от 75 до 350 мм влажность бетона также повысилась относительно начального значения, но незначительно. Это объясняется увеличением электропроводности жидкой фазы и, следовательно, увеличением влажности за счет растворения щелочей из состава цемента [7]. В верхней части колонны зафиксировано незначительное снижение влажности бетона по сравнению с начальным значением, так как сверху фрагмент колонны был закрыт полиэтиленовой пленкой и слоем утеплителя. Тем самым последствия внешнего массопереноса оказали минимальное влияние на результаты.

2. Период выдерживания. В процессе выдерживания бетона, подвергающегося термообработке, в конструкции установилось стабильное поле влажности (см. рис. 5, 6). Значения перепада влажности по высоте фрагмента колонны в течение последних 35 ч эксперимента в периферии и 45 ч в центре сечения были примерно одинаковыми и составляли приблизительно 4 %. В свою очередь перепад влажности относительно линий размещения датчиков в створах А и В по всей высоте конструкции колонны составлял $\approx 0,5\%$ в последние 35 ч эксперимента. Разница в полученных перепадах влажности по ширине и высоте конструкции, кроме меньшего размера горизонтальных размеров колонны, относительно вертикальных, объясняется основным направлением внутреннего массопереноса, так как промерзшее основание создает больший температурный градиент, чем опалубочные щиты.

Максимальные значения наблюдались в периферии сечения и в области границы стыка колонны и промерзшего основания, так как процесс внутреннего массопереноса влаги способствовал ее переносу в более холодные области бетона (щиты опалубки и основание).

В промерзшем бетонном основании во время выдерживания сложились свои закономерности. В первые часы кондуктометрический датчик, расположенный в толще основания на высоте 50 мм от стыка, не отмечал изменения электрического сопротивления. Это связано с проводимостью состояний воды, так бетон основания был охлажден до -30°C и вода в нем находилась в твердой фазе (лед). Через 19 ч, когда температура основания увеличилась до $-8,6^{\circ}\text{C}$, влажность составила 1,97 %. Ее увеличение происходило в течение всего эксперимента, и только в последние 16 ч она стабилизировалась.

Из результатов эксперимента видно, что вследствие действия постоянного распределенного источника тепла в конструкции установился регулярный тепловой режим. Видимо он явился гарантом стабильности полей влажности.

3. Завершающий период эксперимента. По окончании эксперимента (см. рис. 5, 6, 8) наибольшие изменения (увеличение) влажности бетона, не считая верхней части фрагмента колонны,

наблюдаются на высоте колонны от 0 до 75 мм, куда влага за счет массопереноса мигрировала из бетона верхней и средней части. Влага распределилась следующим образом:

- наименьшее значение оказалось в верхней части $\approx 1,5\text{--}2,5\%$;
- влажность среднего слоя $\approx 1,5\text{--}3,0\%$;
- на высоте колонны от 25 до 75 мм зафиксировано еще большее значение влажности бетона фрагмента колонны $\approx 2,5\text{--}4,5\%$;
- на стыке колонны и основания влажность бетона оказалась максимальной $\approx 6\%$.

Низкую влажность бетона в верхней и средней части фрагмента колонны можно объяснить переносом влаги в бетон средних и нижних слоев. В бетоне средней зоны фрагмента колонны наблюдаются незначительные изменения влажности, в то время как в нижней части, граничащей с промороженным основанием, наблюдаются существенные изменения поля влажности, что наверняка отражает интенсивный массоперенос в эту зону.

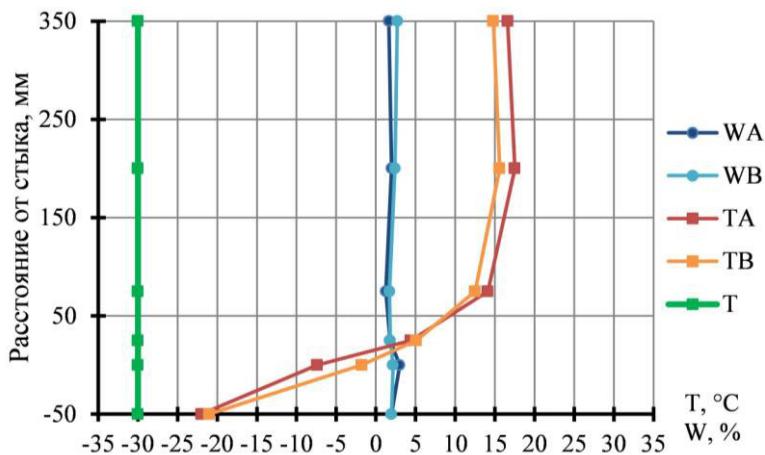


Рис. 8. Распределение температуры и влажности по высоте конструкции в конце эксперимента (через 86 ч):
 WA, WB, TA, TB – влажность и температура по линии датчиков А и В;
 Т – температура в климатической камере

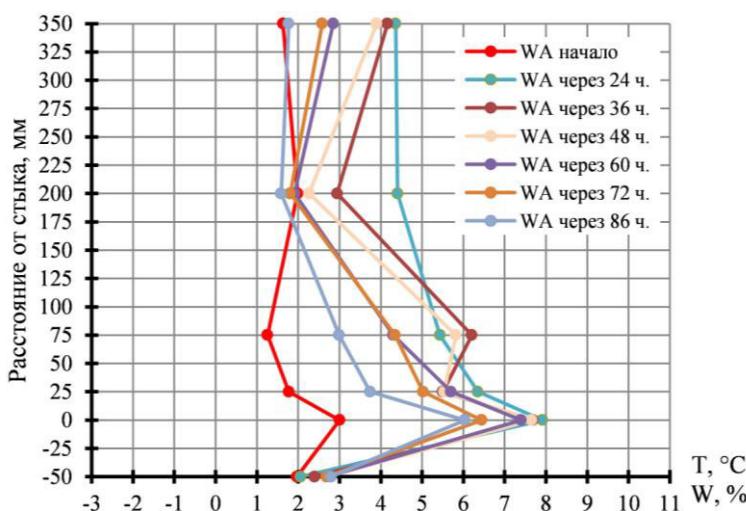


Рис. 9. Распределение влажности бетона по высоте экспериментальной конструкции по линии датчиков А

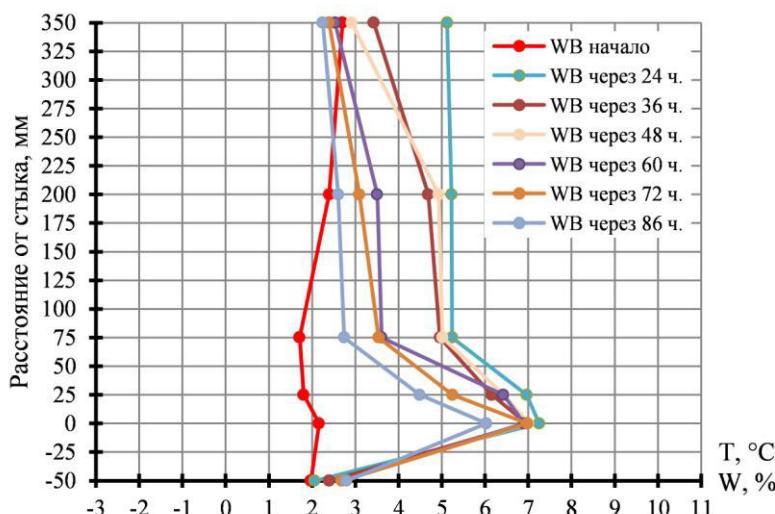


Рис. 10. Распределение влажности бетона по высоте экспериментальной конструкции по линии датчиков В

По всей высоте колонны в центре ее сечения бетон имел влажность меньше, чем бетон, расположенный в периферии колонны. Это объясняется тем, что помимо миграции влаги к холодному основанию за счет массопереноса, влага также мигрировала к холодным щитам опалубки по всей высоте колонны.

Влажность основания повысилась с 1,97 до 2,8 % за последние 67 ч эксперимента.

4. Влияние изменения влажности бетона на его прочность.
По характеру изменения влажностного поля можно сделать вывод, что процесс внутреннего массопереноса приводит к переувеличению и, следовательно, к увеличению водоцементного отношения охлажденных слоев бетона. За счет этого, по мнению большинства исследователей, происходит снижение прочности [9]. Большой конкретики достиг А.М. Гусаков в работе по изучению процесса внутреннего массопереноса в бетоне на ранней стадии выдерживания [3], в которой привел зависимость прочности бетона от водоцементного отношения и расстояния от охлажденного торца экспериментальной установки (рис. 11).

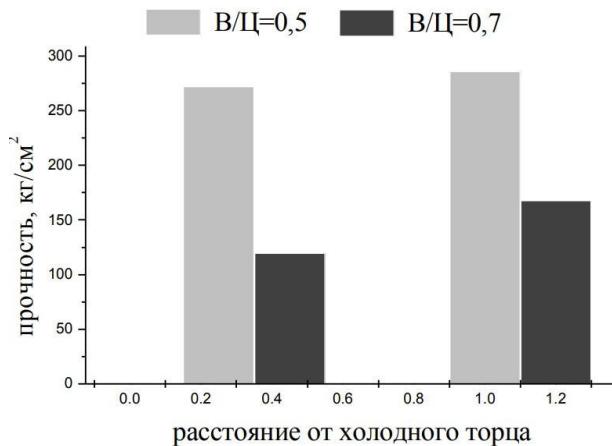


Рис. 11. Зависимость прочности бетонных образцов от водоцементного отношения и расстояния от холодного торца [3]

Из рис. 11 следует, что увеличение водоцементного отношения переувлажненных слоев бетона в 1,4 раза, вызванное внутренним массопереносом, уменьшает их прочность на 30 %. В процессе эксперимента охлажденные слои бетона переувлажнились в 2 раза в центре и в 2,5 раза на периферии сечения колонны относительно исходной влажности.

Основываясь на [3], легко выводится пропорция, по которой прочность охлажденного бетона на расстоянии до 25 мм от стыка уменьшилась приблизительно на 45–55 % по всему сечению относительно ожидаемой прочности, полученной при бетонировании конструкции без влияния промерзшего основания.

Стоит заметить, что данное значение не является точным, носит оценочный характер и требует проверки путем конкретного теоретического и экспериментального исследования. Однако упомянутые данные позволяют уверенно сказать, что в переувлажненном бетоне сопряжения каркасных конструкций, бетонируемых в зимних условиях, прочность может существенно снижаться, что не гарантирует обеспечение пространственной жесткости каркаса всего здания [10].

Выводы

1. Результаты экспериментального исследования процесса внутреннего массопереноса позволили выявить его наличие и оценить основные параметры этого процесса (температуру и влажность) в условиях, подобных выдерживанию монолитной конструкции с электропрогревом бетона греющими проводами, уложенного на промерзшее основание при отрицательных температурах без специальных мер, способных предотвратить переувлажнение бетона. В результате установлено, что бетон, находящийся на расстоянии до 75 мм от границы стыка по высоте колонны, переувлажнялся в 2–2,5 раза. Перенос влаги наблюдался как в продольном, так и в поперечном направлении к щитам опалубки. Значения в центре и на периферии ближе к концу эксперимента различались на 0,5 %; на 0,8 % повысилась влажность бетонного основания.

2. Полученные результаты по миграции влаги косвенно подтверждают исследования В.Я. Гендина и А.Д. Мягкова по замоноличиванию в зимних условиях стыков сборных железобетонных конструкций и подтверждают прямую зависимость уменьшения прочности бетона от увеличения его влажности. При увеличении влажности бетона в 2÷2,5 раза в результате действия внутреннего массопереноса его прочность может снизиться на 45÷55 % и привести к опасным последствиям.

3. Из вышеперечисленного следует, что процесс внутреннего массопереноса, возникающий при производстве работ в условиях отрицательных температур, следует учитывать при технологическом проектировании и в процессе выполнения работ, предусматривая меры, способные уменьшить степень его влияния на прочность конструкций.

Список литературы

1. Гныря, А. И. Технология бетонных работ в зимних условиях / А. И. Гныря, С. В. Коробков. – Томск : ТГАСУ, 2011. – 412 с.
2. Бржанов, Р. Т. Проблемы выбора методов зимнего бетонирования / Р. Т. Бржанов // Вестник ПГУ. – 2009. – № 2. – С. 14–33.
3. Гусаков, А. М. Процессы внутреннего массопереноса в бетоне на ранней стадии выдерживания в технологии зимнего бетонирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. М. Гусаков. – Томск, 2006.
4. Даужанов, Н. Т. Тепло- и массообмен при различных технологиях гелиотермообработки железобетона / Н. Т. Даужанов, Л. Б. Аруова // Вестник МГСУ. – 2011. – № 4. – С. 288–292.
5. Утенков, В. Ф. Заделка стыков сборных железобетонных конструкций в зимних условиях / В. Ф. Утенков, М. А. Владисова. – Москва : Госиздательство по строительству и архитектуре, 1958. – 62 с.

6. ГОСТ 12730.2-78. Бетоны. Метод определения влажности : введ. 01.01.1980 / Госстрой СССР. – Москва : Изд-во стандартов, 1980. – Гр. Ж19.
7. Щерба, В. В. Технология бетонирования конструкций монолитных зданий с предохранением бетона от обезвоживания путем применения пленкообразующих материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. В. Щерба. – Москва, 2005.
8. Гендин, В. Я. Кондуктометрический метод исследования массопереноса в стыках для выбора вида и количества противоморозной добавки при замоноличивании в зимних условиях. Тепло- и массоперенос в процессах твердения материалов на основе вяжущих веществ / В. Я. Гендин, А. Д. Мягков, Л. С. Гончаров. – Томск : ТГУ, 1985. – 129 с.
9. Неделя, Н. Н. Влияние влажности бетона на его прочность / Н. Н. Неделя // Бетон и железобетон. – 1983. – № 3.
10. Клюев, К. А. Влияние дефектов конструкций и ошибок проектирования на этапах возведения монолитного каркасного здания / К. А. Клюев, А. А. Кузнецов // СтройМного. – 2017. – № 1 (6).
11. Ghosh, R. S. Winter concreting in Canada / R. S. Ghosh, J. N. Mustard // Canadian journal of civil engineering. – 2011. – No. 10 (3). – P. 510–526.
12. Zhu, Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete / Bofang Zhu. – Kidlington, Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ ПО МЕТОДУ «ТЕРМОС» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ

М.М. Титов^{*}, М.С. Волков^{}**

Приведены данные теоретических исследований по повышению эффективности расчета процесса технологии зимнего бетонирования по методу «термос» в стадии остывания бетонного массива. Установлены области влияния параметров и факторов на достоверность и эффективность расчетов. Получены уравнения регрессии, необходимые для расчетов технологии зимнего бетонирования по специальным алгоритмам. Материал исследований направлен на совершенствование методической базы в области строительства в зимних условиях.

Ключевые слова: критерии подобия, анализ размерностей, остывание, матрица размерностей уравнения.

Введение

Использование метода термоса в зимнем бетонировании известно с середины 1930-х гг. Но точность расчетов по уравнению баланса зависит от многих исходных параметров и поэтому невелика. В технических науках известен метод расчета любых процессов с использованием безразмерных критериев подобия физических и модельных процессов. Представляет серьезный интерес для применения в производственных процессах, так как различие геометрии узлов и конструкций бетонируемых зданий по виду и размерам невелико и позволяет просто и быстро решить производственные задачи, зная небольшой набор исходных величин [1–4].

^{*} Д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и организации строительства НГАСУ (Сибстрин)

^{**} Магистрант кафедры технологии и организации строительства НГАСУ (Сибстрин)

Целью исследования является повышение эффективности расчетных алгоритмов процессов зимнего бетонирования строительных конструкций.

Актуальность темы определяется необходимостью повышения достоверности обоснований параметров зимнего бетонирования конструкций.

Методика исследования

Для определения критериев с помощью теоремы необходимо:

- выявление m параметров $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k, \dots, P_s, \dots, P_m$, которые характеризуют изучаемый процесс;
- составление матрицы размерностей m параметров;
- установление числа k независимых между собой параметров;
- представление описания изучаемого явления в критериальной форме;
- составление выражений $m-k$ критериев подобия во всех формах записи.

Рассмотрим подробнее перечисленные операции, иллюстрируя их ранее приведенным примером нахождения критериев подобия механических колебаний.

Участвующих величин будет шесть ($m = 6$):

$$\begin{aligned}P_1 &= c; P_2 = m; P_3 = F; \\P_4 &= K_T; P_5 = t; P_6 = \tau.\end{aligned}$$

Здесь c – удельная теплоемкость материала; m – масса бетонного массива; F – модуль поверхности; K_T – коэффициент теплопередачи; t – температура; τ – время.

Функциональная зависимость, подлежащая исследованию, имеет вид:

$$\varphi(c, m, F, K_T, t, \tau) = 0.$$

Выберем четыре ($k = 4$) независимых единицы применительно к системе измерений $LMTQ$. Пусть $P_1 = c$; $P_2 = m$; $P_3 = F$; $P_6 = \tau$. Тогда система уравнений примет вид:

$$\begin{aligned}[c] &= [M]^0 [L]^3 [T]^{-2} [Q]^{-1}; \\ [m] &= [M]^1 [L]^0 [T]^0 [Q]^0; \\ [F] &= [M]^0 [L]^2 [T]^0 [Q]^0; \\ [\tau] &= [M]^0 [L]^0 [T]^1 [Q]^0. \end{aligned}$$

Остальные два ($m = 6$) уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned}[K_T] &= [M]^1 [L]^0 [T]^{-3} [Q]^{-1}; \\ [t] &= [M]^0 [L]^0 [T]^0 [Q]^1. \end{aligned}$$

Проверим правильность сделанного выбора числа независимых параметров ($k = 4$), составив матрицу размерностей уравнений:

$$D_{1-4} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & -2 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 2,$$

т.е. $D_{1-4} \neq 0$. Следовательно, значение $k = 4$ выбрано правильно и величины c, m, F, τ действительно независимы.

Нахождение критериев подобия заключается в определении формы записи их согласно уравнению и далее в отыскании значений показателей степени $a'_s, \dots, b'_s, \dots, c'_s$.

Применимтельно к данному примеру:

$$\pi_1 = \frac{K_T}{c^{a_{K_T}} \cdot m^{b_{K_T}} \cdot F^{c_{K_T}} \cdot \tau^{d_{K_T}}};$$

$$\pi_2 = \frac{t}{c^{a_t} \cdot m^{b_t} \cdot F^{c_t} \cdot \tau^{d_t}}.$$

Определим значения $a'_s, \dots, b'_s, \dots, c'_s$.

Необходимо составить определитель D порядка k из размерностей параметров, участвующих в процессе. Найти определители D_{js} , а затем определить:

$$a'_s = D_{1s} / D_{...}; \quad c'_s = D_{ks} / D_{...};$$

Определим: $a^{K_T}, b^{K_T}, c^{K_T}, d^{K_T}$.

Для этого составим и найдем определители для четырех матриц:

$$D_{1K_T}, D_{2K_T}, D_{3K_T}, D_{4K_T}.$$

$$1) \quad D_{1K_T} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -3 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 2;$$

$$2) \quad D_{2K_T} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & -2 & -1 \\ 1 & 0 & -3 & -1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 2;$$

$$3) \quad D_{3K_T} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & -2 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -3 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = -3;$$

$$4) \quad D_{4K_T} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & -2 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -3 & -1 \end{vmatrix} = -2.$$

Таким образом, можно вычислить:

$$a^{K_T} = D_{1K_T}/D = 2/2 = 1;$$

$$b^{K_T} = D_{2K_T}/D = 2/2 = 1;$$

$$c^{K_T} = D_{3K_T}/D = (-3)/2 = (-1,5);$$

$$d^{K_T} = D_{4K_T}/D = (-2)/2 = (-1).$$

Определим: a^t, b^t, c^t, d^t .

Для этого составим и найдем определители для четырех матриц:

$$D_{1t}, D_{2t}, D_{3t}, D_{4t};$$

$$1) \quad D_{1t} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = -2;$$

$$2) \quad D_{2t} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 0;$$

$$3) \quad D_{3t} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & -2 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 3;$$

$$4) \quad D_{4t} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & -2 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = -4.$$

Таким образом, можно вычислить:

$$a^t = D_{1t}/D = (-2)/2 = (-1);$$

$$b^t = D_{2t}/D = 0;$$

$$c^t = D_{3t}/D = 3/2 = 1,5;$$

$$d^t = D_{4t}/D = (-4)/2 = (-2).$$

Подставив полученные значения в изначальные уравнения, получим два критерия подобия:

$$\pi_1 = \frac{K_T}{c^1 \times m^1 \times F^{(-1,5)} \times \tau^{(-1)}};$$

$$\pi_2 = \frac{t}{c^{(-1)} \times m^0 \times F^{1,5} \times \tau^{(-2)}}.$$

Проверим правильность критериев по размерностям:

$$\pi_1 = \frac{K_T \times F^{2/3} \times \tau}{c \times m} = \frac{\theta^1 \times M^1 \times L^3 \times T^3}{M^1 \times L^3 \times T^3 \times \theta^1} = 1;$$

$$\pi_2 = \frac{t \times c \times \tau^2}{F^{2/3}} = \frac{\theta^1 \times L^3 \times T^2 \times T^{-2} \times \theta^{-1}}{L^3} = 1.$$

Следовательно, полученные критерии безразмерны. Таким образом, найденные критерии запишем так:

$$\pi_1 = K_T \times \frac{F^{2/3} \times \tau}{c \times m}; \quad \pi_2 = t \times \frac{c \times \tau^2}{F^{2/3}}.$$

Безразмерные критерии π_1 и π_2 позволяют для любых геометрически подобных конструкций определить технологические параметры процесса остывания и набора прочности K_T , τ , t по графику зависимости $\pi_1 = f(\pi_2)$, найденной экспериментально один раз.

Результаты исследования основаны на получении вычислительного инструмента получения достоверных результатов расчетов параметров зимнего бетонирования по методу «термос» с использованием критериев подобия.

Материал исследований может быть использован для аналитических расчетов, проектов и планов зимнего бетонирования строительных объектов.

Согласование с известными данными

Результаты исследований по расчету термоагрузки являются развитием существующих основ теории зимнего бетонирования строительных процессов объектов [4] и дополнено развитием знаний в области инноваций в расчетном комплексе инженерных расчетов.

Использование предложенного метода расчета повышает достоверность обоснования параметров зимнего бетонирования и эффективность вычислительного комплекса обоснования проектных решений.

Список литературы

1. *Веников, В. А.* Теория подобия и моделирования : учеб. пособие для вузов / В. А. Веников. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва, 1976. – 479 с.
2. *Бермант, А. Ф.* Краткий курс математического анализа / А. Ф. Бермант. – 11-е изд. – Санкт-Петербург : Лань, 2005. – 736 с.
3. *Гухман, А. А.* Применение теории подобия к исследованию процессов тепломассообмена : учеб. пособие для вузов / А. А. Гухман. – Москва : Высшая школа, 1973. – 295 с.
4. *Шенк, Х.* Теория инженерного эксперимента : пер. с англ. / Х. Шенк. – Москва : Мир, 1972. – 384 с.

СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621. 542. 001

ВАРИАНТЫ СРЕДСТВ ПЕРЕПУСКА ВОЗДУХА В ВИДЕ ПАЗА В ПНЕВМОУДАРНОМ МЕХАНИЗМЕ СО СТУПЕНЧАТЫМ УДАРНИКОМ

Н.Ю. Клюшова^{*}, Д.Э. Абраменков^{},
А.В. Грузин^{***}, Э.А. Абраменков^{****}**

Рассматривается синтез пневматических ударных механизмов с применением признаков-элементов классификации конструктивных элементов ударника-поршня. Приводится качественная оценка изменений в процессах воздухораспределения при перепусках воздуха между рабочими камерами. Показано различие ограничений в описании процесса перепуска воздуха при изменении формы перепускных каналов, выполненных в виде канал-пазов на штоковой части ступенчатого ударника. Различия в системах перепуска предполагает применение конструктивного изменения канал-пазов в пневматических ударных механизмах с различными процессами формирования силового импульса в рабочих камерах.

Ключевые слова: канал-паз, ступенчатый ударник, форма паза, перепуск, воздухораспределение.

Введение

Появление классификации [1] признаков-элементов пневматических ударных механизмов (ПУМ) предопределяет расширение представлений о многообразии конструктивных признаков средств воздухораспределения, например на ударнике-

* Магистрант кафедры строительных машин, автоматики и электротехники НГАСУ (Сибстрин)

** Д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой зданий, строительных конструкций и материалов СГУПС

*** Ассистент кафедры строительных машин, автоматики и электротехники НГАСУ (Сибстрин)

**** Д-р техн. наук, профессор кафедры строительных машин, автоматики и электротехники НГАСУ (Сибстрин)

поршне [2] в виде канал-пазов. Общие и частные свойства, характерные для процессов перепуска воздуха между рабочими камерами, рассматриваются в представленной работе. Для более четкого представления о влиянии на рабочий процесс только канал-пазов различной формы приводится сравнение известного ПУМ [3] и синтезированного с изменением только конструктивной формы канал-пазов при всех других признаков-элементов без изменений.

Принципиальные схемы ПУМ с признаками-элементами перепуска воздуха

На рис. 1 представлена принципиальная схема ПУМ [3] с кратким описанием его устройства и работы:

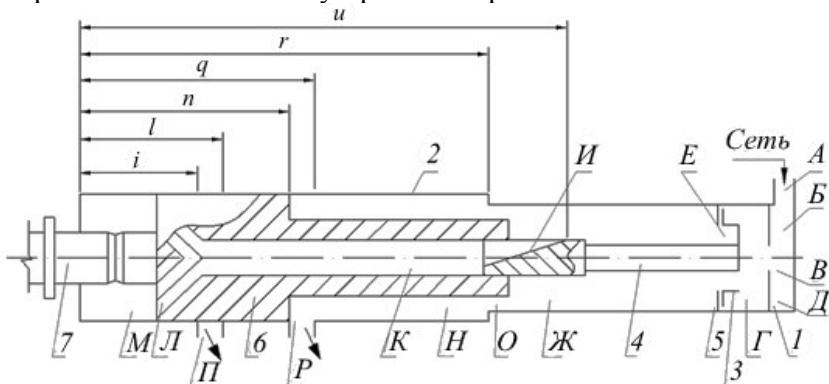


Рис. 1. Принципиальная схема ПУМ [3]

Сжатый воздух из сети поступает по каналу *A* с проходным сечением ω_A в сетевую камеру *B* с объемом V_B в крышке 1 массой m_1 , откуда по каналу *B* с проходным сечением ω_B в предкамеру *Г* с объемом V_Γ в цилиндре 2 массой m_2 и далее по каналу *D* с проходным сечением ω_D в стакане 3 массой m_3 стержня 4 массой m_4 , кольцевому каналу *E* с проходным сечением ω_E во фланце 5 массой m_5 в кольцевую распределительную камеру *Ж* с объемом $V_\text{Ж}$ с функциями камеры рабочего хода. В зависимости от положения ступенчатого ударника 6 массой m_6 воздух

поступает по наклонному канал-пазу I с проходным сечением ω_i . На поршневой части стержня в центральный канал K в ударнике с проходным сечением ω_K , радиальный канал L , проходным сечением $\omega_i = \omega_L = \omega_K$ в поршневой части ударника и в управляющую камеру M с объемом V_M холостого хода. Кольцевая камера H рабочего хода с объемом V_H постоянно сообщена с распределительной камерой J кольцевым каналом O с проходным сечением ω_H в виде зазора, образованным штоком ударника и корпусом.

Опорожнение камеры M осуществляется в зависимости от положения ударника через выпускной канал P с проходным сечением ω_P и P с проходным сечением $\omega_P > \omega_{Pi}$ в стенке цилиндра.

Под действием разности силовых импульсов со стороны камер J , M и H ударник совершает возвратно-поступательные движения и периодически наносит удары по хвостовику инструмента 7 массой m_7 .

Присоединенные массы $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_7$ закреплены относительно корпуса (включая воздухоотбойные кольца, глушители, амортизаторы, устройства крепления инструмента и другие возможные массы), суммарная масса которых входит в массу m_k корпуса.

Отметим, что буквенные и цифровые индексы приняты в соответствии с обозначениями на рис. 1.

Обозначения к физико-математическому описанию рабочих процессов известного и синтезированного ПУМ

$p_A, p_C, p_B, p_\Gamma, p_J, p_H, p_M$ – давление воздуха в атмосфере, сети и рабочих камерах с объемами $V_B, V_\Gamma, V_J, V_H, V_M$;

$\varphi_B, \varphi_\Gamma, \varphi_J, \varphi_H, \varphi_M$ – коэффициенты бародинамического состояния воздуха в камерах объемами $V_B, V_\Gamma, V_J, V_H, V_M$;

$\omega_A, \omega_B, \omega_D, \omega_i, \omega_L, \omega_E$ – площади сечений каналов впуска A, B, D, I, L, E ;

ω_0, ω_H – площади сечений каналов перепуска;

ω_P, ω_R – площади сечений каналов выпуска;

i, l, n, q, r, u – координаты положения начала и окончания впуска, перепуска и выпуска (см. рис. 1, 2);

$$W = \sqrt{\frac{2kR}{(k-1)}}, \quad (1)$$

где R – газовая постоянная; k – показатель процесса; t – время.

$\left(\frac{dx_y}{dt}\right)_O, \left(\frac{dx_k}{dt}\right)_O$ – скорости отскока ударника и корпуса от инструмента;
 $\left(\frac{dx_y}{dt}\right)_y, \left(\frac{dx_k}{dt}\right)_y$ – скорости соударения ударника и корпуса об инструмент;

k_y, k_k – коэффициенты отскока ударника и корпуса от инструмента;

$S_y, S_{\text{Ш}}, S_{\text{КШ}}$ – площади поперечного сечения ударника, штока, кольца штока; поршневой части стержня;

$m_k = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_7$ – масса корпуса;

m_y – масса ударника;

F_H – усилие нажатия на корпус.

3. Уравнения рабочего процесса базового ПУМ

Уравнения бародинамического процесса в ПУМ:

$$\frac{dp_B}{dt} = k \frac{[W(\omega_A \varphi_A - \omega_B \varphi_B)]}{V_B}, \quad (2)$$

$$\frac{dp_\Gamma}{dt} = k \frac{[W(\omega_B \varphi_B - \omega_\Delta \varphi_\Delta)]}{V_\Gamma}, \quad (3)$$

$$\frac{dp_\Delta}{dt} = k \frac{[W(\omega_\Delta \varphi_\Delta - \omega_E \varphi_E)]}{V_\Delta}, \quad (4)$$

$$\frac{dp_K}{dt} = k \frac{[W(\omega_E \varphi_E - \omega_H(x_y) \varphi_H - \omega_K \varphi_K) + p_K \left(\frac{dx_y}{dt}\right)(S_y - S_{\text{КШ}} - S_4)]}{[V_K - x_y(S_y - S_{\text{КШ}} - S_4)]}, \quad (5)$$

$$\frac{dp_H}{dt} = k \frac{[W(\omega_0 \varphi_0 - \omega_P(x_y) \varphi_P) + p_H \left(\frac{dx_y}{dt}\right)(S_y - S_{\text{Ш}})]}{[V_H - x_y(S_y - S_{\text{Ш}})]}, \quad (6)$$

$$\frac{dp_M}{dt} = k \frac{\left[W(\omega_H(x_y)\varphi_H - \omega_\Pi(x_y)\varphi_\Pi) + p_M \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right]}{(v_M - x_y S_y)}. \quad (7)$$

Ограничения для φ_i :

$$\varphi_{ij} \equiv \varphi_{ji} = \begin{cases} 0,2588 \cdot p_i \sqrt{\theta_i} & \text{при } 0,5283 > p_i / p_j, \\ p_j \sqrt{\theta_i} \cdot \sqrt{\left(p_i / p_j \right)^{2/k} - \left(p_i / p_j \right)^{(1+k)/k}} & \text{при } 0,5283 \leq p_i / p_j, \\ -0,2588 \cdot p_j \sqrt{\theta_j} & \text{при } 0,5283 > p_j / p_i, \\ -p_j \sqrt{\theta_j} \cdot \sqrt{\left(p_j / p_i \right)^{2/k} - \left(p_j / p_i \right)^{(1+k)/k}} & \text{при } 0,5283 \leq p_j / p_i, \end{cases} \quad (8)$$

где $\frac{p_i}{p_j}$ – отношение давления в сети и камере; $\frac{p_j}{p_i}$ – отношение давлений в камере и сети (обратное течение воздуха); θ_i , θ_j – температура воздуха в сети и камере; k – показатель процесса.

Уравнения баромеханического процесса в ПУМ [2]:

$$\frac{d^2 x_y}{dt^2} = \frac{[p_M S_y - p_H(S_y - S_{\text{ш}}) - p_{\text{Ж}}(S_y - S_{k\text{ш}} - S_4)]}{m_y} \quad \text{при } x_y > 0, \quad (9)$$

$$\frac{d^2 x_k}{dt^2} = \frac{[p_M S_y - p_H(S_y - S_{\text{ш}}) - p_{\text{Ж}}(S_y - S_{k\text{ш}} - S_4) + F_H]}{m_k} \quad \text{при } x_k > 0. \quad (10)$$

Ограничения для x_y и x_k :

$$\left(\frac{dx_y}{dt} \right)_O = -k_y \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_y \leq 0, \quad (11)$$

$$\left(\frac{dx_k}{dt} \right)_O = -k_y \left(\frac{dx_k}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_k \leq 0. \quad (12)$$

Постоянно открытые геометрические площади сечений каналов-дросселей приняты со значениями $\omega_A = \text{const}$, $\omega_B = \text{const}$, $\omega_D = \text{const}$, $\omega_E = \text{const}$, $\omega_O = \text{const}$, для которых действуют ограничения φ_i (8).

Ограничения для ω_Π и ω_P (см. рис. 1):

$$\omega_{\Pi}(x_y) = \begin{cases} x_y \neq 0 & \omega_{\Pi} = 0, \\ 0 < x_y < a & \omega_{\Pi} = 0, \\ a < x_y < b & \omega_{\Pi} = (b - a)z_{\Pi}, \\ b < x_y & \omega_{\Pi} = (b - a)z_{\Pi}. \end{cases} \quad (13)$$

где z_{Π} – ширина канала Π выпуска.

$$\omega_P(x_y) = \begin{cases} x_y \neq 0 & \omega_P = 0, \\ 0 < x_y < c & \omega_P = 0, \\ c < x_y < d & \omega_P = (b - a)z_P, \\ d < x_y & \omega_P = (b - a)z_P. \end{cases} \quad (14)$$

где z_P – ширина канала P выпуска.

Ограничения для ω_H (см. рис. 1):

$$\omega_H(x_y) = \begin{cases} (x_y + L_y) = 0 & \omega_H = 0.25(f - e)z_H, \\ 0 < (x_y + L_y) < (f - e) & \omega_H = 0.5(f - e)z_H, \\ (f - e) < (x_y + L_y) & \omega_H = 0. \end{cases} \quad (15)$$

где z_H – ширина канала H выпускка.

В (13) и (14) каналы Π и P выпуска приняты квадратными со сторонами z_{Π} и z_P . В (14) канал H перепуска принят в виде треугольника со сторонами $(f - e)$ и z_H . Может иметь различные формы, продольные и поперечные исполнения, например [2]. В (6) $\omega_O = \text{const}$ с геометрической площадью сечения, зависящей от принятой формы: кольцо, окружность и др.

Конструктивные размеры для ω_{Π}, ω_P и ω_H принимаются после уточнения их формы и коэффициентов расходов, определяемых, например, расчетами по [4] или [5], или продувкой реальных форм каналов выпуска и перепуска. Конструктивные решения установки стержня в ПУМ исключает его продольное перемещение.

Принципиальная схема синтезированного ПУМ отличается от ПУМ [3] только канал-пазом перепуска на штоке ударника, представлена на рис. 2 и содержит краткое описание и обозначения.

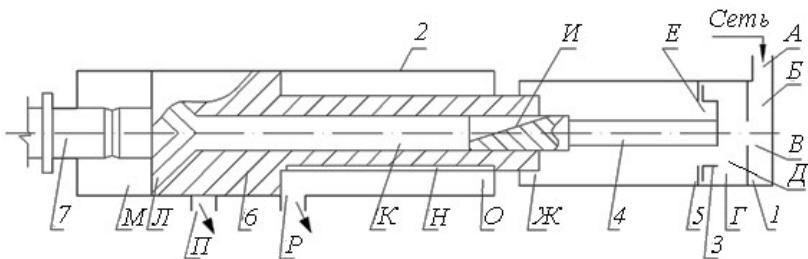


Рис. 2. Принципиальная схема синтезированного ПУМ

Сжатый воздух из сети поступает по каналу А с проходным сечением ω_A в сетевую камеру B с объемом V_B в крышке 1 массой m_1 , откуда по каналу B с проходным сечением ω_B в предкамеру Γ с объемом V_Γ в цилиндре 2 массой m_2 и далее по каналу D с проходным сечением ω_D в стакане 3 массой m_3 стержня 4 массой m_4 , кольцевому каналу E с проходным сечением ω_E во фланце 5 массой m_5 в кольцевую распределительную камеру \mathcal{J} с объемом $V_{\mathcal{J}}$ с функциями камеры рабочего хода. В зависимости от положения ступенчатого ударника 6 массой m_6 воздух поступает по наклонному канал-пазу I с проходным сечением ω_I на поршневой части стержня, в центральный канал K в ударнике с проходным сечением ω_K и радиальный канал L с проходным сечением $\omega_L = \omega_k$ в поршневой части ударника и в управляющую камеру M с объемом V_M холостого хода. Также в зависимости от положения ударника воздух из камеры \mathcal{J} периодически поступает по канал-пазу H с проходным сечением ω_H в кольцевую камеру O рабочего хода с объемом V_O . Опорожнение камер M и O осуществляется в зависимости от положения ударника, через выпускной канал Π с проходным сечением ω_Π и P с проходным сечением $\omega_P > \omega_\Pi$ в стенке цилиндра.

Под действием разности силовых импульсов со стороны камер J , M и O ударник совершает возвратно-поступательные движения и периодически наносит удары по хвостовику инструмента 7 массой m_7 .

Канал-паз H может иметь изменяющееся проходное сечение за счет углубления или радиального расширения (например, в виде ромба, треугольника, трапеции, окружности, эллипса или другой овальной формы).

4. Уравнения рабочего процесса синтезированного ПУМ

$$\frac{dp_B}{dt} = k \frac{[W(\omega_A \varphi_A - \omega_B \varphi_B)]}{V_B}, \quad (16)$$

$$\frac{dp_\Gamma}{dt} = k \frac{[W(\omega_B \varphi_B - \omega_\Gamma \varphi_\Gamma)]}{V_\Gamma}, \quad (17)$$

$$\frac{dp_\Delta}{dt} = k \frac{[W(\omega_\Delta \varphi_\Delta - \omega_E \varphi_E)]}{V_\Delta}, \quad (18)$$

$$\frac{dp_J}{dt} = k \frac{\left[W(\omega_E \varphi_E - \omega_H(x_y) \varphi_H - \omega_H(x_y) \varphi_H) + p_J \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_{III} - S_4) \right]}{[V_J - x_y (S_y - S_{kIII} - S_4)]}, \quad (19)$$

$$\frac{dp_O}{dt} = k \frac{\left[W(\omega_H(x_y) \varphi_H - \omega_P(x_y) \varphi_P) + p_O \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_{III}) \right]}{[V_O - x_y (S_y - S_{III})]}, \quad (20)$$

$$\frac{dp_M}{dt} = k \frac{\left[W(\omega_H(x_y) \varphi_H - \omega_P(x_y) \varphi_P) - p_M \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right]}{(V_M + x_y S_y)}. \quad (21)$$

Ограничения для φ_i принимаются аналогично (7).

Уравнения баромеханического процесса в синтезированном ПУМ:

$$\frac{d^2 x_y}{dt^2} = \frac{[p_M S_y - p_0 (S_y - S_{III}) - p_J (S_y - S_{kIII} - S_4)]}{m_y}, \text{ при } x_y > 0; \quad (22)$$

$$\frac{d^2 x_k}{dt^2} = \frac{[p_M S_y - p_0 (S_y - S_{III}) - p_J (S_y - S_{kIII} - S_4) + F_H]}{m_k}, \text{ при } x_k > 0. \quad (23)$$

Ограничения для $x_y \neq 0$ и $x_k \neq 0$ принимаются аналогично (8) и (9).

Поскольку синтез ПУМ относится только к признакам-элементам перепуска, то аналогично [3] принимаются значения $\omega_A = \text{const}$, $\omega_B = \text{const}$, $\omega_\Delta = \text{const}$, $\omega_E = \text{const}$, для которых действуют ограничения (7).

Ограничения для площадей канал-пазов перепуска между камерами \mathcal{K} и O следующие.

Для канал-паза в виде прямоугольника с постоянным сечением (рис. 3а):

$$\omega_{\mathcal{K}}(x_y) = \begin{cases} x_y = 0 & \omega_H = 0, \\ 0 < x_y < h & \omega_H = 0, \\ h < x_y < (h + h_1) & \omega_H = bz, \\ (h + h_1) < x_y & \omega_H = 0. \end{cases} \quad (24)$$

Для канал-паза в виде двух расходящихся вершинами прямоугольных треугольников с переменным сечением (рис. 3б):

$$\omega_{H2}(x_y) = \begin{cases} x_y = 0 & \omega_H = 0, \\ 0 < x_y < h & \omega_H = 0, \\ h < x_y < (h + h_2) & \omega_H = 0.5cz, \\ (h + h_2) < x_y < (h + h_2 + h_3) & \omega_H = 0, \\ (h + h_2 + h_3) < x_y & \omega_H = 0. \end{cases} \quad (25)$$

Для канал-паза в виде прямоугольного треугольника с вершиной со стороны распределительной камеры с переменным сечением (рис. 3в):

$$\omega_{H3}(x_y) = \begin{cases} x_y = 0 & \omega_H = 0, \\ 0 < x_y < h & \omega_H = 0, \\ h < x_y < (2/3 h_1 + h) & \omega_H = 0.25dz, \\ (2/3 h_1 + h) < x_y < (h_1 + h) & \omega_H = 0.5dz, \\ (h + h_1) < x_y & \omega_H = 0. \end{cases} \quad (26)$$

Для канал-паза в виде прямоугольного треугольника с вершиной со стороны кольцевой камеры рабочего хода с переменным сечением (рис. 3г):

$$\omega_{H4}(x_y) = \begin{cases} x_y = 0 & \omega_H = 0, \\ 0 < x_y < h & \omega_H = 0, \\ h < x_y < (1/3 h_1 + h) & \omega_H = 0.25ez, \\ (1/3 h_1 + h) < x_y < (h_1 + h) & \omega_H = 0.5ez, \\ (h + h_1) < x_y & \omega_H = 0. \end{cases} \quad (27)$$

Для канал-паза в виде ярусов вдоль образующей штоковой части ступенчатого ударника с разделяющими перемычками постоянного размера (рис. 3д):

$$\omega_{H5}(x_y) = \begin{cases} x_y = 0 & \omega_H = 0, \\ 0 < x_y < h & \omega_H = 0, \\ h < x_y < (h + h_6) & \omega_H = fz, \\ (h + h_6) < x_y < (h + h_6 + r_2) & \omega_H = 0, \\ (h + h_6 + r_2) < x_y < (h + h_6 + r_2 + h_5) & \omega_H = fz, \\ (h + h_6 + r_2 + h_5) < x_y < (h + h_6 + r_2 + h_5 + r_1) & \omega_H = 0, \\ (h + h_6 + r_2 + h_5 + r_1) < x_y < (h + h_6 + r_2 + h_5 + r_1 + h_4) & \omega_H = fz, \\ (h + h_6 + r_2 + h_5 + r_1 + h_4) < x_y & \omega_H = 0. \end{cases} \quad (28)$$

Сравнивая физико-математическое описание рабочих процессов в общем виде, отметим следующее. Уравнения (2)–(5), (7) и (17)–(19), (21) характеризуют практически одинаковые рабочие процессы. Тоже можно отметить относительно уравнений (9), (10) и (22), (23). Ограничения для φ_i (8) и $x_y \leq 0$, $x_k \leq 0$ (11), (12) одинаковы для известного [3] и синтезированного ПУМ. Различия в системах описания рабочего процесса представлены уравнениями (6) и (20), содержащие комбинации ($\omega_0\varphi_0$) и ($\omega_H(x_y)\varphi_H$) из-за площади сечения перепускного канала $\omega_0 = \text{const}$ и $\omega_H \neq \text{const}$. Последнее можно представить изображениями вариантов на рис. 3 в зависимости от формы площади и ее расположения по отношению к перемещению ударника, которые представлены ограничениями (24)–(28).

Разницу в идеях применения, представленных на рис. 3, конструктивных решений, которые характеризуются «выполнением канал-паза на боковой поверхности штоковой части ступенчатого ударника», можно объяснить необходимостью реали-

зации различных эффектов работы ПУМ за счет разнообразных вариантов перепуска воздуха между камерами.

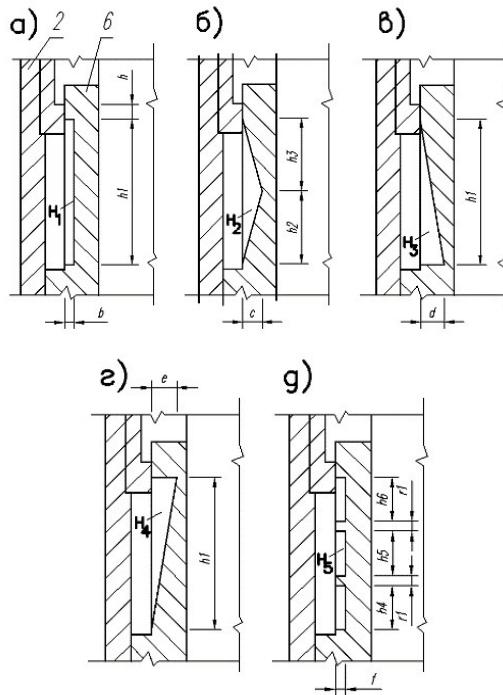


Рис. 3. Варианты конструктивных средств перепуска в синтезированном ПУМ с учетом [1, 2].

Принимая во внимание известную информацию о течении жидкости и газов, например [4–9], можно объяснить процессы и характер течения воздуха в каналах различной формы и протяженности, в особенности каналов подвижных с местными сопротивлениями, которые имеют место в вариантах исполнения канал-пазов. Отметим, что предположить получение аналогичных эффектов в процессе течения воздуха в каналах с подвижной стенкой является более сложной задачей.

В приведенных вариантах исполнения канал-пазов, учитывая движения основной части канала на боковой поверхности

штоковой части ступенчатого ударника, движущегося со скоростью $4\div 12$ м/с, принимаем влияние на характер движения потока воздуха незначительным для практических целей. Отметим также, что при учете, опускаемых в данном рассмотрении эффектов воздухораспределения, качественное и количественное влияния будут изменяться пропорционально расходу воздуха во времени рабочего цикла.

Таким образом, ограничения по текущему расходу воздуха и формированию силового импульса по давлению в кольцевой камере рабочего хода (возможно и в распределительной камере) для форм канал-пазов перепуска вида H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 (см. рис. 3) будут находиться в зависимости от функции перемещения ударника по времени ($x_y(t)$) и изменения формы и расположения.

Для упрощения условий сравнения вариантов примем равными: общие длины и продольные площади сечений канал-пазов перепуска; ширину канал-пазов; координаты начала и окончания процесса перемещения воздуха на штоковой части ступенчатого ударника; общий расход воздуха каждым канал-пазом; давление воздуха в распределительных камерах за время цикла; геометрические площади сечений постоянно открытых каналов-дресселей впуска.

Количество фиксированных значений промежуточных координат на длинах канал-пазов для подсчета текущих значений ω_i отмечается по характерным сечениям очертаний канал-пазов, проходные сечения между которыми считаются усредненными для данного участка перемещения ступенчатого ударника (см. рис. 3): $h, h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, r_1$. В соответствии с рис. 3 следует:

- h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 – протяженность канал-пазов перепуска воздуха;
- b, c, d, e, f – глубина канал-пазов перепуска воздуха;
- h, r_1 – протяженности выступов перекрытия канал-пазов;
- H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 – очертания форм продольных разрезов канал-пазов на штоковой части ступенчатого ударника.

Ширина канал-пазов может быть принята одинаковой или переменной для h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 .

Различия в протекании процессов перепуска в синтезированных вариантах ПУМ

Для варианта, представленного на рис. 3б, где канал-паз выполнен в виде расходящихся вершинами прямоугольных треугольников с уменьшающимся поперечным сечением в стороны распределительной камеры и кольцевой камеры рабочего хода отметим следующее: при холостом ходе ступенчатого ударника, далее ударника, кольцевая камера рабочего хода наполняется воздухом плавно до окончания перепуска из распределительной камеры, что не вызывает резкого торможения ударника, удлиняет участок его перемещения при рабочем ходе с возрастающим наполнением кольцевой камеры рабочего хода и обуславливает возрастание кинетической энергии удара, передаваемой рабочему инструменту.

Для варианта, представленного на рис. 3в, где канал-паз выполнен в виде прямоугольного треугольника с уменьшающейся площадью поперечного сечения в сторону распределительной камеры: при холостом ходе ударника увеличивается участок его перемещения с резким торможением в конце и увеличение импульса давления воздуха при разгоне ударника во время его рабочего хода.

Для варианта, представленного на рис. 3г, где канал-паз выполнен в виде прямоугольного треугольника с уменьшающейся площадью поперечного сечения в сторону кольцевой камеры рабочего хода: при холостом ходе ударника обеспечивается эффективное наполнение кольцевой камеры рабочего хода до перекрытия канал-паза перепуска. Последующее сжатие воздуха осуществляется с более резким возрастанием противодавления воздуха и более резким торможением с остановкой ударника. При рабочем ходе ударника после некоторого расширения воздуха осуществляется резкий его выпуск и ударник получает дополнительный импульс, что обуславливает увеличение скорости

ударника и его кинетической энергии, которая передается рабочему инструменту.

Для варианта, представленного на рис. 3д, где канал-паз выполнен в виде ярусов прямоугольных канал-пазов, разделенных перемычками: при холостом и рабочем ходах ударника кольцевая камера рабочего хода наполняется прерывисто, вследствие чего камера является источником колебаний, передаваемых в течении рабочего цикла корпусу ПУМ, который будет обладать вибрационно-ударным режимом работы.

Можно рекомендовать в связи с изменением $p_i(t)$ в камере рабочего хода, являющейся основной в формировании силового импульса следующие возможные применения рассмотренных признаков-элементов. Предпочтительное применение канал-пазов, представленных на рис. 3: а, б – в машинах ударного действия для разработки локальных объемов мерзлого грунта, кирпичной кладки и т.п. материалов; в – в ручных машинах: молотках, рубильных, клепальных, отбойных, ломах; г – в тяжелых машинах для уплотнения грунта, забивки свай и шпунта в грунтовые среды; д – в машинах ударно-вибрационного воздействия на обрабатываемую среду, предпочтительно песок и подобные грунтовые среды.

Заключение

1. Выполнение канала перепуска в виде постоянно открытого дросселя предельно просто конструктивно и технологично в изготовлении, однако управление расходом воздуха осуществляется только за счет изменяющегося отношения давлений в сообщенных между собой камерах.

2. Выполнением канал-паза перепуска воздуха любой формы в продольном разрезе можно получить в объемах камер различные формы силовых диаграмм импульсов давления в основной камере ПУМ.

3. Прерывистый впуск воздуха в рабочую камеру предопределяет получение устойчивого ударно-вибрационного режима работы ПУМ.

Список литературы

1. Абраменков, Э. А. Пневматические механизмы машин ударного действия : Дроссельные, струйные беззолотниковые, бесклапанные : справ. пособие / Э. А. Абраменков, Д. Э. Абраменков. – Новосибирск, 1993. – 430 с.
2. Классификационные признаки-элементы ударника-поршня пневматических ударных механизмов / Ю. Э. Малышева, Д. Э. Абраменков, А. С. Дедов, Э. А. Абраменков // Известия вузов. Строительство. – 2016. – № 12. – С. 72–81.
3. Пат. 2547876 Российской Федерации, МПК 1/30, Е21C37/22. Пневматический ударный механизм / Д. Э. Абраменков, Э. А. Абраменков, А. В. Грузин, Р. А. Данилин, А. В. Куликов, Н. А. Попов, Л. Т. Хомякова. – Заявл. 11.01.2013 ; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10.
4. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – Москва : Машиностроение, 1975. – 559 с.
5. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1982. – 224 с.
6. Чжен, П. Отрывные течения / П. Чжен ; пер. с англ. Д. Н. Голубинского. – Москва : Мир, 1972. – Т. 1. – 229 с.
7. Чжен, П. Отрывные течения / П. Чжен ; пер. с англ. Д. Н. Голубинского. – Москва : Мир, 1973. – Т. 2. – 280 с.
8. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – 5-е изд. перераб. – Москва : Наука, 1978. – 736 с.
9. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг ; пер. с нем. Г. А. Вольперта. – 5-е изд. – Москва : Наука, 1974. – 711 с.

ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ СИБИРИ

Г.К. Щепотин*, Б.В. Крутасов**

В холодных климатических условиях обеспечению эксплуатационной надежности дорог препятствуют большие годовые и суточные колебания температур, вследствие чего в асфальтобетоне появляются дополнительные растягивающие напряжения, вызываемые изменением длины дорожного покрытия, которые приводят к образованию трещин разрыва. Морозное пучение и весенние просадки основания интенсивно увеличивают их размеры. Как результат – ускоренное разрушение покрытия. В этих условиях необходимо разработать стратегию сплошного усиления автомобильных дорог сибирского региона. В основе стратегии – комплекс мероприятий по внедрению эффективных противодеформационных конструкций для ликвидации деформаций морозного пучения и весенних просадок основания, а также усиление асфальтобетонного покрытия для восприятия нагрузок от большегрузного транспорта с целью обеспечения длительной и безопасной эксплуатации дорог в условиях низких температур.

Ключевые слова: температура, морозное пучение, весенние просадки, неравномерные деформации, трещины разрыва, противодеформационные конструкции, усиление дорог.

Повышение качества перевозок и снижение эксплуатационных расходов при обеспечении безопасности движения являются первоочередными задачами развития автомобильного транспорта.

Надежные дороги – основа экономического развития любого региона. Вместе с тем в августе 2016 г. Минтранс РФ признал безопасными только 10 % автомобильных дорог России.

* Д-р техн. наук, профессор кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов НГАСУ (Сибстрин)

** Канд. техн. наук, доцент кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов НГАСУ (Сибстрин)

Заводы-изготовители и эксплуатационники имеют средства для повышения надежности дорожных конструкций, но не имеют таких средств, чтобы сделать их абсолютно надежными. Поэтому важно научиться оценивать надежность дорог на всех этапах (от момента изготовления до укладки и последующей эксплуатации), что позволит в дальнейшем разрабатывать методы повышения надежности.

Актуальность разработок в области надежности дорог усиливается с ростом нагрузок на дорожные конструкции при движении большегрузного транспорта, повышением скорости движения автотранспорта, требованием обеспечения безопасности движения.

Особенность эксплуатации дорог в регионах Сибири – большие годовые и суточные колебания температур, что существенно снижает эксплуатационную надежность дорог [1].

При больших сезонных амплитудах колебания температуры в асфальтобетоне появляются дополнительные растягивающие напряжения, вызываемые изменением длины дорожного покрытия.

Известно, что удлинение (укорочение) свободного стержня (без трения) можно определить как

$$\lambda = \alpha L \Delta t, \quad (1)$$

где α – коэффициент линейного расширения материала; L – длина стержня; Δt – изменение температуры.

При жестком защемлении концов стержня температурные напряжения составят

$$\sigma_t = E \frac{\lambda}{L}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала.

В этом случае величину продольной температурной силы можно вычислить по формуле

$$N_t = F \sigma_t, \quad (3)$$

где F – площадь поперечного сечения.

При превышении температурной силой сил сопротивления дорожного покрытия растяжению в поперечном сечении асфальтобетона образуется трещина, что наблюдается при низких отрицательных температурах зимой (рис. 1).

Разрушение дорожного покрытия начинается с появления микротрещин разрыва, которые впоследствии (соединяясь) образуют макротрещины.

Таким образом, в процессе эксплуатации автомобильных дорог с покрытием нежесткого типа постепенно образуются поперечные температурные трещины разрыва. Данные трещины формируются на всем протяжении участка дороги через каждые 70–80 м (см. рис. 1).

В весенний период интенсивность роста трещин возрастает. В это время наблюдаются суточные колебания температуры, которая может многократно переходить через ноль. Днем лед оттаивает, и вода заполняет существующие трещины. Ночью наблюдается обратный процесс – вода в трещинах замерзает. Образование льда приводит к появлению дополнительных сил, способствующих росту трещин разрыва.



Рис. 1. Трещины разрыва (ул. Кирова, Новосибирск, июль 2016 г.)

Весна (апрель–май) – наиболее опасный сезон года в работе автомобильных дорог. В этот период оттаивает основание, и оседают распученные зимой грунты земляного полотна [2]. Интенсивность накопления остаточных деформаций и формирование «колейности» существенно возрастает.

Характерный график накопления остаточных деформаций дороги (от начала оттаивания до очередного промерзания основания) приведен на рис. 2.

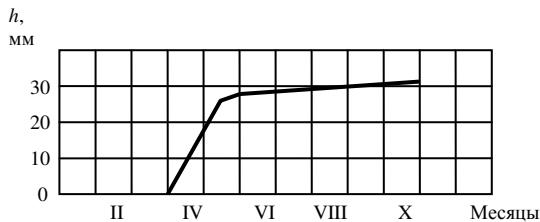


Рис. 2. График накопления остаточных деформаций h по сезонам года

Из рис. 2 видно, что интенсивность накопления остаточных деформаций сильно меняется: максимальная интенсивность наблюдается весной, в период оттаивания (апрель–май) за счет оседания при оттаивании распученных грунтов земляного полотна.

В летне-осенний период интенсивность накопления остаточных деформаций сравнительно невелика. Осадки накапливаются в этот период практически только за счет пластических деформаций от динамических нагрузок автотранспорта.

Морозное пучение грунтов основания неравномерно как по простирианию, так и по глубине в пределах зоны промерзания [3].

Осадки весной при оттаивании протекают также неравномерно как вдоль, так и поперек оси дороги.

Оценить неравномерность можно нивелировкой основания в соседних точках. Результаты нивелирования сравниваются между собой по формуле

$$d_i = h_{ni} - h_{li}, \quad (4)$$

где h_{ni} – деформация в i -й точке справа от оси дороги, мм; h_{li} – деформация в i -й точке слева от оси дороги, мм.

На рис. 3 приведена характерная гистограмма частостей распределения разности деформаций основания в поперечном профиле дороги.

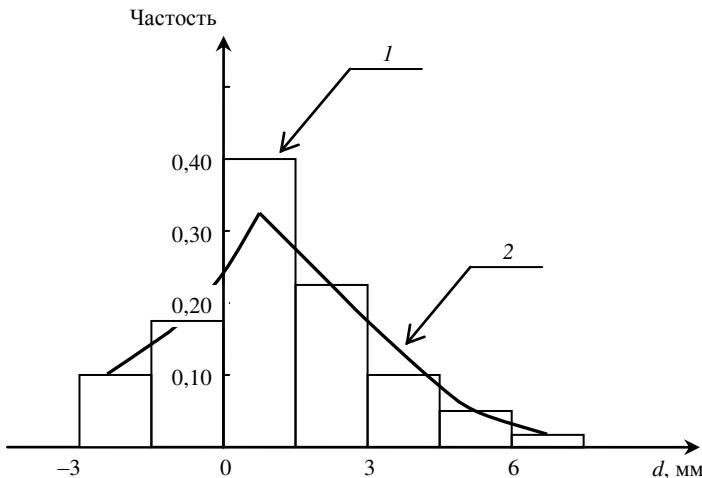


Рис. 3. Гистограмма частостей распределения разности деформаций d в поперечном профиле:

1 – опытные данные; 2 – теоретическое распределение

В этом случае плотность вероятностей распределения разности деформаций подчиняется нормальному закону распределения случайных величин

$$f(d) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(d-\bar{d})^2}{2S^2}\right\}, \quad (5)$$

где \bar{d} и S – среднее значение и среднеквадратичное отклонение.

Расчетную схему покрытия дороги в летнее время можно представить в виде плиты, которая нагружается пульсационной нагрузкой и опирается на сплошное упругое основание.

В процессе промерзания-оттаивания покрытие будет уже опираться только в точках контакта с основанием. Это существенно меняет напряженно-деформационное состояние покрытия. В этих условиях нагружения покрытие должно быть значительно более прочным, чем традиционно укладываемый асфальтобетон. Рост давления на дороги в этот сезон года от движения большегрузного транспорта только увеличивает интенсивность разрушения дорожных одежд.

Таким образом, в условиях эксплуатации дорог в Сибири с покрытием нежесткого типа неравномерность пучения приводит к формированию трещин разрыва. При этом оттаивание мерзлых грунтов земляного полотна сопровождается снижением их несущей способности и появлением просадок оснований, что увеличивает размер этих трещин. Трещины образуются в результате действия растягивающих напряжений.

Простым увеличением налогов на большегрузный транспорт и запретом на его движение в весенне время задачу обеспечения эксплуатационной надежности дорог не решить.

Для ее осуществления необходимо разработать стратегию реконструкции и сплошного усиления автомобильных дорог регионов Сибири.

В основе стратегии – внедрение эффективных противодеформационных конструкций для ликвидации деформаций морозного пучения и весенних просадок основания, а также усиление асфальтобетонного покрытия и основания для восприятия нагрузок от большегрузного транспорта с целью обеспечения длительной и безопасной эксплуатации дорог в условиях низких температур.

Решать задачу повышения эксплуатационной надежности дорог необходимо с проведения исследования и обобщения опыта эксплуатации их в сложных инженерно-геологических и климатических условиях. Нормы проектирования необходимо адаптировать к холодным климатическим условиям регионов Сибири [4].

Существующая нормативно-техническая документация не отражает в полной мере складывающуюся в регионах Сибири динамику структуры транспортного потока в сочетании со сложными геологическими и климатическими условиями (например, растет интенсивность движения большегрузного транспорта, а климат теплее не становится).

Считается также допустимым использование местных песков. Хотя известно, что местные мелкие и пылеватые пески являются пучиноопасными. Упускается из виду возможность широкого использования накладных подушек из асбестового балласта, укладка которых уменьшает глубину промерзания, а следовательно, и объем земляных работ.

Основным производителем данного вида балласта в Российской Федерации является ОАО «Ураласбест», который является первым предприятием в России, получившим от немецкого органа по сертификации TUV-CEPT сертификат на систему менеджмента качества в области производства нерудных строительных материалов по международному стандарту ИСО-9001 [5].

Асбестовый балласт представляет собой мелкие фракции дробленых пород (серпентиниты) с небольшим содержанием свободных волокон несортового хризотил-асбеста. Требования ТУ [6] к асбестовому балласту по зерновому составу следующие. Зерен размером более 25 мм должно быть не более 20 %, а размером 0,14 мм и менее – 80–100 %. Зерновому состав асбестового балласта близок к гравелистому песку.

Толщину такой противодеформационной подушки необходимо определять из условия обеспечения несущей способности подстилающих ее глинистых грунтов.

Для предотвращения пластических сдвигов в верхней части толщи глинистых грунтов должно выполняться неравенство

$$\sigma \leq R, \quad (6)$$

где σ – напряжения от внешних нагрузок (транспорт и вес грунта); R – несущая способность основания из глинистых грунтов.

Для решения данной задачи были выполнены инженерно-геологические обследования и произведены расчеты требуемой толщины подушки H_p в условиях Сибири [4].

Результаты исследований позволили сопоставить фактические значения текучести грунтов L_L с расчетной величиной H_p , при которой обеспечивается несущая способность глинистых грунтов в условиях Сибири. На рис. 4 приведено поле корреляции H_p от L_L .

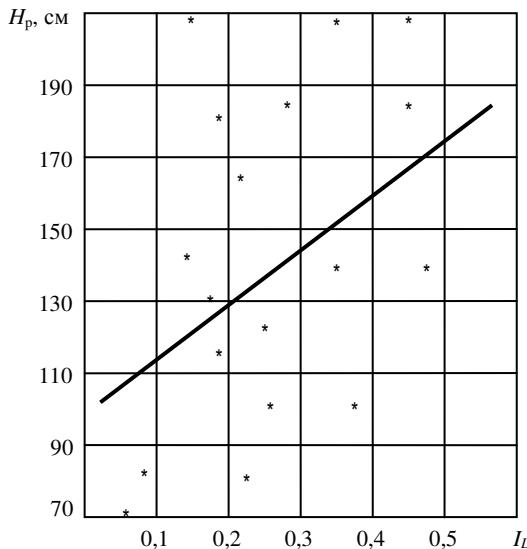


Рис. 4. Зависимость расчетной толщины слоя балластных материалов H_p от показателя текучести глинистых грунтов I_L :
* – результаты расчета

Методом наименьших квадратов получены параметры этой зависимости:

$$H_p = 99,4 + 157I_L. \quad (7)$$

Из анализа данных рис. 4 следует, что с увеличением показателя текучести грунтов I_L растет необходимость в увеличении

мощности защитного слоя H_p из балластного материала. Так, при мягкопластичной консистенции ($I_L = 0,50\text{--}0,75$) величина H_p должна превышать 1,7 м. Данная консистенция в условиях Сибири в весенний период наблюдается повсеместно.

При проектировании противодеформационных мероприятий крайне важно выполнять расчет по условию обеспечения несущей способности глинистых грунтов и, если это необходимо, назначать мероприятия по ее повышению.

В отличие от щебеноочно-песчаных смесей асбестовый балласт обладает также специфическими водными свойствами. А именно, он впитывает воду, имеет хорошую водоудерживающую и слабую фильтрационную способность в уплотненном состоянии (0,2 м/сут, что соответствует недренирующим грунтам). Поэтому асбестовый балласт сбрасывает воду по поверхности призмы на откосы, не допуская переувлажнения нижележащих глинистых грунтов земляного полотна.

Это видно по изменениям в течение талого периода года влажности асбестового балласта на глубине 20 см от поверхности.

Характерная для асбестового балласта динамика влажности материала по сезонам года приведена на рис. 5.

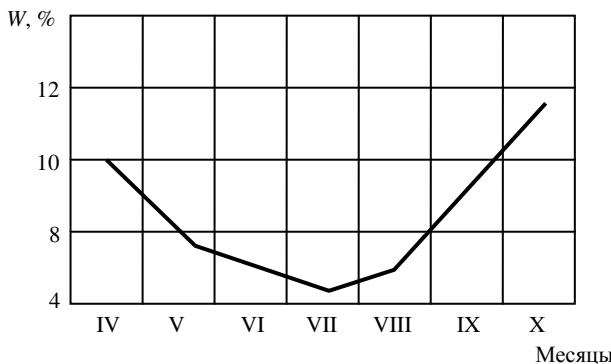


Рис. 5. Влажность асбестового балласта по сезонам года

Из анализа графика видно, что весной (в период оттаивания) и осенью (перед началом замерзания) влажность максимальна, но не превышает 10–12 %. Летом она снижается до 5 %. Наблюдаемая динамика влажности объясняется сухим летом и достаточно обильными осадками осенью.

Таким образом, к числу благоприятных качеств асбестового балласта следует отнести противопучинные свойства, высокую несущую способность и сопротивляемость вибрационным воздействиям, незначительную водопроницаемость и относительно постоянный влажностный режим, а также стоимость, которая почти в 3 раза меньше, чем стоимость используемых в настоящее время щебеночно-песчаных смесей.

Применение асбестового балласта на автомобильных и железных дорогах Урала позволяет эффективно бороться с пучинными деформациями в условиях холодного климата [7].

Расчетная глубина промерзания также вызывает большие сомнения, так как ее в расчетах допускается принимать равной 2/3 от нормативной величины для данной местности [8]. При этом морозное пучение считается допустимым в размере 30–40 мм. Хотя опыт эксплуатации дорог указывает на недопустимость пучения [2].

Эксплуатируемые в настоящее время дороги построены по старым нормативам и требуют реконструкции с учетом возрастающих нагрузок от автотранспорта. Только ограничением движения большегрузного транспорта в весенний период года надежность дорог не обеспечить.

Актуальность решения этих задач обусловливается необходимостью ускорения экономического развития регионов Сибири.

Список литературы

1. Бредюк, Г. П. О способах оценки эксплуатационной надежности земляного полотна / Г. П. Бредюк, Г. К. Щепотин // Проблемы транспортного строительства в Сибири. – Новосибирск, 1989. – С. 22–24.

2. Щепотин, Г. К. Повышение морозоустойчивости земляного полотна автомобильных дорог / Г. К. Щепотин, Н. А. Машкин // Известия вузов. Строительство. – 2015. – № 3. – С. 85–91.
3. Орлов, В. О. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений / В. О. Орлов, Ю. Д. Дубнов, Н. Д. Меренков. – Ленинград : Стройиздат, 1977. – 183 с.
4. Щепотин, Г. К. Усиление подшпальной основания безстыкового пути / Г. К. Щепотин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. ун-та путей сообщения, 2008. – 150 с.
5. Осинцев, А. А. Производство строительных материалов ОАО «Ураласбест» / А. А. Осинцев // Промышленный транспорт Урала. – 2007. – № 4–5. – С. 21–23.
6. ТУ 32-ЦП-782-92. Смесь песчано-щебеночная из отсевов дробления серпентинитов для балластного слоя железнодорожного пути : утв. 15.08.92. – Москва, 1992.
7. Методические рекомендации по применению асбестового балласта на железнодорожном транспорте : утв. 07.08.08 / Министерство промышленности и науки Свердловской области. – Екатеринбург, 2008. – 13 с.
8. Рувинский, В. И. Оптимальные конструкции земляного полотна / В. И. Рувинский. – Москва : Транспорт, 1982. – 166 с.

ПРИРОДООХРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 697.34

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦЕНТРАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Т.А. Рафальская^{*}, А.О. Рагинская^{}**

Проведен анализ современного состояния и перспектив развития централизованного теплоснабжения в России. Определены основные проблемы теплофикационных систем. Рассмотрены мировые тенденции развития теплоснабжения на примере зарубежных стран. Сделан сравнительный анализ систем теплоснабжения в России и за рубежом. Выявлены пути повышения эффективности централизованного теплоснабжения с использованием современных технологий.

Ключевые слова: централизованное теплоснабжение, температурный график, тепловой пункт, тепловые сети, источники теплоты.

Введение

За 100 лет развития российская система теплоснабжения стала самой большой в мире. Система теплоснабжения страны состоит из примерно 50 тыс. локальных систем теплоснабжения, обслуживаемых 17 тыс. предприятий теплоснабжения. В составе источников ТЭ: 497 ТЭЦ (из них 244 ТЭЦ общего пользования и 253 ТЭЦ промышленных предприятий); 705 котельных мощностью свыше 100 Гкал/ч; 2847 котельных мощностью от 20 до 100 Гкал/ч; 14 358 котельных мощностью от 3 до 20 Гкал/ч; 48 075 котельных мощностью до 3 Гкал/ч, а также более 12 млн индивидуальных тепловых установок. Теплота от этих источников передается по тепловым сетям протяженностью 176,5 тыс. км в двухтрубном исчислении (это в 5,5 раза больше, чем в США)

^{*} Канд. техн. наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции НГАСУ (Сибстрин)

^{**} Магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции НГАСУ (Сибстрин)

с общей площадью поверхности около 180 км² для примерно 44 млн абонентов [1].

Централизованным теплоснабжением для нужд отопления обеспечены 80 % жилищного фонда России (91 % в городах и 52 % в сельской местности), а горячей водой из систем централизованного теплоснабжения – 63 % населения России (79 % в городах и 22 % в сельской местности) [2].

На долю России приходится 44 % мирового централизованного производства. Ни одна страна в мире по масштабам централизованного теплоснабжения не может сравниться с Россией. Потребление тепловой энергии только в Москве превышает ее суммарное потребление в Голландии и Швеции вместе взятых, а потребление теплоты в Санкт-Петербурге выше, чем в Финляндии или Дании.

Все региональные рынки тепловой энергии можно разделить на четыре основных категории: сверхкрупные – 15 городов с потреблением тепловой энергии более 10 млн Гкал в год; крупные – 44 города с потреблением от 2 до 10 млн Гкал в год; средние – сотни городов с потреблением от 0,5 до 2 млн Гкал в год; малые – более 40 тыс. поселений с потреблением тепла от централизованных источников менее 0,5 млн Гкал в год. Последняя группа, характеризуемая множественными мелкими и, как правило, низкоэффективными системами теплоснабжения, является наиболее проблемной. Она создает непропорционально большую экономическую нагрузку по обеспечению надежности системы теплоснабжения. На ее долю приходится около 15 % производимой тепловой энергии, но более 30–35 % бюджетных средств, направленных на финансирование систем теплоснабжения и их подготовки к зиме. Для этих систем характерны самые высокие тарифы при самой низкой покупательной способности потребителей и самым высоким уровнем задолженности.

Основные характеристики систем теплоснабжения России в 2006 и 2016 гг. приведены в табл. 1.

Таблица 1
Основные характеристики систем теплоснабжения России
в 2006 и 2016 гг. [2, 3]

| Показатели | Единицы измерения | 2006 г. | 2016 г. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------|----------|
| Число изолированных систем теплоснабжения | тыс. | Около 50 | Около 50 |
| Число предприятий теплоснабжения | ед. | 21 368 | 17 183 |
| ТЭЦ общего пользования | ед. | 242 | 244 |
| ТЭЦ промышленных предприятий | ед. | 245 | 253 |
| Котельные | ед. | 67 913 | 65 985 |
| Индивидуальные теплогенераторы | млн | Более 12 | Более 12 |
| Число центральных тепловых пунктов | ед. | Нет данных | 22 806 |
| Объем произведенной тепловой энергии в системах централизованного теплоснабжения | млн. Гкал | 1650 | 1638 |
| Средний тариф на тепловую энергию | руб./Гкал | 195 | 470 |
| Доля жилого фонда, оснащенного централизованным теплоснабжением | % | 73 | 80 |
| Доля жилого фонда, оснащенная горячим водоснабжением | % | 59 | 63 |
| Средний КПД котельных | % | 80 | 78 |
| Доля тепловых сетей, нуждающихся в замене | % | 16 | 25 |
| Фактические расходы на мероприятия по повышению энергоэффективности на источниках теплоснабжения | млрд руб. | Нет данных | 9,5 |

Из приведенных данных видно, что эффективность производства тепловой энергии в целом по стране несколько снизилась. Доля потерь в тепловых сетях увеличилась и достигла 14–17 % от суммарного потребления тепловой энергии и 18–20 % от ее полезного потребления. Доля потерь тепловой энергии увеличилась с 7 % в 2006 г. до 9 % в 2010 г. Фактические теплоизтраты в большинстве систем теплоснабжения (преимущественно в мелких) составляют 20–60 %, тогда как в Финляндии даже в малых системах теплоснабжения доля потерь тепловой энергии не превышает 12 %. Высокий уровень потерь энергии определяется как избыточной централизацией многих систем тепло-

снабжения, так и плохим состоянием тепловых сетей, и низким качеством их обслуживания. Около 16 % трубопроводов служат от 5 до 10 лет. Износ тепловых сетей составляет по отдельным муниципальным образованиям и поселениям от 37 до 80 % [1, 2].

Практически во всех городах России применяется верхняя срезка температурного графика центрального регулирования [4], т.е. недогрев воды на источнике теплоты до требуемых значений при низких температурах наружного воздуха (табл. 2).

Таблица 2
Температурные графики центрального регулирования
в городах России

| № п/п | Город | Расчетный температурный график, °C | Верхняя срезка, °C | Ссылка |
|----------|-----------------------------|------------------------------------------|-----------------------|--------|
| 1 | Москва | 150/70 | 130 | [5] |
| 2 | Ессентуки | 115/70 | 95 | [6] |
| 3 | Ростов-на-Дону | 150/70 | 115 | [7] |
| 4 | Екатеринбург | 170/70 | 140 | [8] |
| 5 | Казань | 130/65 | 115 | [9] |
| 6 | Красноярск | 150/70 | 130 | [10] |
| 7 | Сургут | 150/70 | 112 | [11] |
| 8 | Нижний Новгород | 150/70 | 110, 115 | [12] |
| 9 | Томск | 150/70 | 125 | [13] |
| 10 | Иваново | 150/70 | 120 | [14] |
| 11 | Пермь | 150/70 | 135 | [15] |
| 12 | Новый Уренгой | 130/70 | 115 | [16] |
| 13 | Орел | 110/70 | 95 | [17] |
| 14 | Магнитогорск | 150/70 | 110 | [18] |
| 15 | Омск | 150/70 | 130 | [19] |
| 16 | Смоленск | 150/70 | 115 | [20] |
| 17 | Самара | 130/70 | 115 | [21] |
| 18 | Курган | 115/70 | 100 | [22] |
| 19 | Вологда | 130/70 | 115 | [23] |
| 20 | Железногорск (Курская обл.) | 130/70 | 115 | [24] |
| 21 | Новосибирск | 150/70 | 107–118 | [25] |

Результаты обследования российских систем теплоснабжения позволили сформулировать основные системные проблемы функционирования российского теплоснабжения следующим образом [1, 4]:

- отсутствие надежных данных по фактическому состоянию систем теплоснабжения;
- отсутствие роста спроса на теплоту в последние годы на фоне существенного ускорения экономического роста;
- существенный избыток мощностей источников теплоснабжения;
- высокий уровень потерь в тепловых сетях как за счет избыточной централизации, так и за счет обветшания тепловых сетей и роста доли сетей, нуждающихся в срочной замене;
- разрегулированность систем теплоснабжения (высокие потери от перетопов, достигающие 30–50 %);
- некорректность регулирования систем центрального теплоснабжения;

Мировые тенденции в развитии систем теплоснабжения

В североевропейских странах централизованное теплоснабжение широко используется как важнейший источник теплоснабжения жилых домов, офисов и предприятий. Неотъемлемым элементом теплоснабжения являются ТЭЦ. Роль, которую играет централизованное теплоснабжение в той или иной стране, зависит от таких факторов, как климат, экономическая или политическая конъюнктура и т.п.

В настоящее время энергетические предприятия стран Северной Европы поставляют приблизительно 100 ТВт·ч в год теплоты для отопления и горячего водоснабжения. Это превышает 35 % рынка тепла для отопления и горячего водоснабжения в этих странах. Наиболее эффективным и прибыльным централизованное теплоснабжение оказывается в регионах с высоким удельным энергопотреблением.

Для успешной работы системы централизованного теплоснабжения необходим как рынок сбыта, так и «дешевый местный источник энергии», которым может быть теплота, вырабатываемая вместе с электричеством (Дания и Финляндия), геотермальная энергия (Исландия), сбросное тепло мусоросжигательных заводов (Норвегия) или комбинация различных источников энергии (Швеция).

Рассмотрим подробнее системы теплоснабжения различных стран [1, 9, 26, 27].

Дания

Дания имеет большой опыт и традиции в использовании централизованного теплоснабжения и благоприятные условия для его развития с использованием ТЭЦ. Так, 80 % населения страны проживает в городских зонах, страна отличается высоким годовым потреблением тепловой энергии и продолжительным отопительным сезоном, практически все крупные электростанции расположены в непосредственной близости к основным городам. Вследствие этого централизованное теплоснабжение является наиболее распространенным источником теплоты. Системы централизованного теплоснабжения существуют в более чем 450 городах.

Начиная с 1973 г. Дания достигла значительного успеха в реализации энергетических программ. Принятые в 1979 и 1990 гг. законы о теплоснабжении позволили увеличить долю теплоты, производимой в системах централизованного теплоснабжения при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии, с 33 до 64 %. За счет возобновляемой энергии обеспечивается 20 % централизованного теплоснабжения; сжигания отходов – 10 %, сжигания биомассы – 9 %, промышленных отходов теплоты – 1 %. Всего лишь 16 % теплоты централизованных систем производится при сжигании органического топлива на водогрейных котельных (нефти – 1 %, природного газа – 11 %, угля – 4 %).

Столица Дании Копенгаген использует комбинированную выработку тепловой и электрической энергии на протяжении более 50 лет. С 1986 по 1990 г. в Копенгагене были созданы две транспортные системы теплопередачи мощностью 26 тыс. ТДж/год. К системе централизованного теплоснабжения были подключены 45 пиковых и резервных станций, в основном реконструированных котельных; 9 различных установок, обеспечивающих базовую нагрузку, в их числе 4 мусоросжигательных завода и 4 ТЭЦ, работающих на жидким топливом, угле или природном газе. Температурный график всех теплосетей составляет 120/50 °С при рабочем давлении теплоносителя 2,5 МПа.

Финляндия

Централизованное теплоснабжение является основным методом теплоснабжения в городах Финляндии. Сегодня доля теплофикации в теплоснабжении Финляндии составляет 45 %, а в крупных городах – более 80 %. В столице Финляндии Хельсинки степень теплофикации является самой высокой в Западной Европе. Системы централизованного теплоснабжения эксплуатируются более чем в 250 населенных пунктах страны. Более 70 % общей теплоты централизованного теплоснабжения производят ТЭЦ, тогда как доля водогрейных котельных не превышает 30 %.

Основным топливом для централизованного теплоснабжения и комбинированной выработки теплоты являются уголь, природный газ, торф и нефть. Доля нефти, которая используется в качестве резервного топлива, а также для покрытия пиковых нагрузок, не превышает 10 %. Теплота от ТЭЦ подается потребителям с помощью воды, температура которой колеблется от 75 до 115 °С. Суммарная длина сетей централизованного теплоснабжения в 1996 г. составляла 7500 км.

В Хельсинки среднегодовая температура +5,3 °С; население Хельсинки вместе с пригородами превышает 900 тыс. жителей. Система централизованного теплоснабжения в настоящее время покрывает практически весь город, доля теплофикации 92 %,

а поставка тепловой энергии в 2001 г. составила приблизительно 6 ТВт·ч. Общая протяженность теплосетей города в 2001 г. составляла 1130 км (из них 33 км проложены в скалах). Температурный график теплосетей 120/65 °С.

В 1990 г. город Хельсинки был удостоен Почетной награды ООН в области охраны окружающей среды за реализацию программы централизованного теплоснабжения, которая использовала комбинированную выработку для снижения уровня потребления топлива и, в конечном итоге, улучшения состояния окружающей среды.

Швеция

Централизованное теплоснабжение Швеции составляет 42 % рынка тепловой энергии, а в городах эта доля достигает 90 %, обеспечивая главным образом муниципальные потребности в отоплении и горячем водоснабжении. Отпуск теплоты для муниципального и промышленного сектора составляет соответственно 37 и 4 ТВт·ч в год. Промышленные потребители используют поставляемую тепловую энергию в первую очередь для отопления.

Системы централизованного теплоснабжения в большинстве случаев находятся в управлении муниципальных предприятий, которые, как правило, также ответственны за электроснабжение потребителей. Суммарная длина трубопроводов централизованного теплоснабжения – 9964 км. Доля теплоты, поставляемой ТЭЦ при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии составляет 25 %, а доля тепловой энергии, поставляемой водогрейными котельными – 75 %.

В столице Швеции Стокгольме проживают 1240 тыс. человек. Система централизованного теплоснабжения Стокгольма в настоящее время обеспечивает поставку теплоты в количестве, превышающем 5 ТВт·ч в год, что соответствует приблизительно 60 % доли теплоты, необходимой для отопления и горячего водоснабжения города.

В структуре централизованного теплоснабжения Стокгольма особое место занимают три ТЭЦ и одна станция тепло-

снабжения, производство теплоты на которых осуществляется главным образом мазутными водогрейными котлами, электрокотлами и тепловыми насосами. Распределение теплоты в Стокгольме обеспечивается пятью различными тепловыми сетями. Это связано с тем, что город расположен на ряде островов. Общая протяженность теплосетей составляет 765 км, их температурный режим составляет 120/65 °С. Регулирование температуры теплоносителя качественное, с местной количественной подрегулировкой у потребителя.

Норвегия

Система централизованного теплоснабжения Норвегии поставляет тепловую энергию для 3 % бытовых потребителей. Основным источником энергии для выработки теплоты, поставляемой системой централизованного теплоснабжения, являются отходы (49 %), еще одним важным источником служит нефть (20 %), при этом доля электрической энергии составляет 11 %. В некоторых регионах страны подключение к системе централизованного теплоснабжения является обязательным. Суммарная выработка тепловой энергии системой составляет 1,5 ТВт·ч в год, протяженность тепловых сетей 303 км, а принятый температурный график теплосети – 120/70 °С. Столица Норвегии Осло, в которой насчитываются 800 тыс. жителей, только на 10 % снабжается теплотой от централизованной системы теплоснабжения. Это связано с особенностями норвежской энергетики (98 % общей выработки электроэнергии в стране составляет доля гидроэнергетики, а остаток покрывается ветроустановками). Достаточное количество дешевой электроэнергии стимулировало развитие электроотопления (его доля в стране достигает 70 %).

Замена электроэнергии, используемой для отопления, теплотой, вырабатываемой при сжигании в котлах биомассы, отходов, а также вырабатываемой тепловыми насосами, приведет к снижению потребления электрической энергии. В 1980 г. в Осло было начато строительство четырех независимых систем централизованного теплоснабжения. К настоящему времени две

из них объединены и обеспечивают годовую поставку теплоты в размере 560 ГВт·ч. Основные источники теплоты – два мусоросжигательных завода, тепловые насосы и малые пиковые мазутные котельные.

Исландия

Исландия, как и Россия, одна из немногих стран мира, где основным является центральное отопление, но организовано оно необычным образом. В Исландии очень много активных вулканических зон и гейзеров, получать энергию от них наиболее выгодно, и поэтому цены на теплоснабжение в Исландии существенно ниже среднеевропейских. Отопление страны практически полностью обеспечивается этим источником энергии. Доля геотермальной теплоты в централизованном теплоснабжении составляет 96 %, остальные 4 % теплоты вырабатываются электрическими котлами. Общая длина трубопроводов системы централизованного теплоснабжения – 2700 км.

Теплом горячих вод гейзеров здесь даже отогревают тротуары зимой и нагревают воду в муниципальных бассейнах. Остальные 10 % населения согревают дома различными децентрализованными системами, например, бойлерами.

Германия

В этой стране теплоснабжение децентрализовано. Это значит, что тепловая энергия в дома поступает не из общего трубопровода, а вырабатывается каждым домом (квартирой или районом) самостоятельно. Главное преимущество такого подхода – возможность регулировать потребление и выбирать его источник. Частные дома в Германии отапливаются бойлерами, много квартирные – как правило, отдельным газовым оборудованием. При этом немцы ведут четкий учет использованной теплоты в каждой квартире: на всех приборах отопления установлены терморегуляторы, а также приборы учета, которые учитывают количество потребляемого теплоносителя каждой квартирой. В последние годы существенно растет популярность теплоснабжения за счет использования экологичных видов топлива – биомассы, отходов деревообработки, солнечных батарей и про-

чего. Государственные программы компенсируют до 15 % расходов на приобретение и установку такого оборудования.

США

В США отопительные системы преимущественно децентрализованные. В многоквартирных домах для обогрева помещений в основном используют электроприборы – фанкойлы и кондиционеры, в загородных коттеджах – системы, работающие на газе. Считается, что в стране с довольно мягким климатом это не только способ отказаться от дорогостоящей центральной системы отопления, но и возможность каждому расчитывать свои потребности.

Канада

По климатическим условиям эта страна, пожалуй, наиболее близка к России, но расселение населения здесь значительно менее плотное. Во многом из-за этого основным является внутридомовое, т.е. децентрализованное отопление. Чаще всего в Канаде используют электрические нагреватели воздуха (кондиционеры) и газовые бойлеры. Кондиционеры удобны еще и тем, что летом они легко переходят в режим охлаждения.

Китай

Из-за довольно мягкого климата в стране для отопления в основном используют электричество. Кроме кондиционеров, китайцы греются электрическими одеялами и электрическими обогревателями. В бедных районах используют печки, которые топят дровами или углем. Централизованное отопление здесь применяется только в нескольких регионах к северу от реки Янцзы, где климат более суровый. При этом зимой туристы нередко жалуются на холод в отелях, где температура может опускаться ниже 10 °C.

Япония

В Японии нет привычной нам системы централизованного теплоснабжения, исключением является только холодная и снежная префектура Хоккайдо, где дома отапливаются горячей водой. На всей же остальной территории японского архипе-

лага население обогревает себя самостоятельно. В качестве топлива в Японии используются керосин и электричество.

Румыния

Примерно 30 % всех зданий в Румынии получают теплоту и горячую воду через системы централизованного теплоснабжения. В городских районах этот показатель составляет 58 %. На долю централизованного теплоснабжения приходится приблизительно 31 % общего объема спроса на теплоту и горячую воду в стране. В целом поставкой тепловой энергии занимаются 179 операторов сетей централизованного теплоснабжения. Разрабатываются различные проекты международного сотрудничества в целях реконструкции и модернизации сетей и тепловых электростанций.

Сравнительный анализ систем централизованного теплоснабжения в РФ и за рубежом

Основные показатели эффективности систем теплоснабжения некоторых российских и зарубежных городов [1, 2] показаны в табл. 3.

Таблица 3

Основные показатели эффективности систем теплоснабжения некоторых российских и зарубежных городов

| Показатель | Единицы измерения | Ханты-Мансийск | Нефтеюганск | Радужный | Страны ЕС | Дания (Копенгаген) | Финляндия (Хельсинки) |
|---------------------------------|-------------------|----------------|-------------|----------|------------|--------------------|-----------------------|
| Имеющийся резерв мощности | % | 58 | 39 | 20 | 10 | 26 | Нет данных |
| Доля ТЭЦ | % | 85–87 | 91 | 88–90 | Нет данных | Нет данных | 93 |
| Потери воды в теплосетях | % | 16,6 | 11,3 | 15,8 | 5–12 | Нет данных | 6,5 |
| Потребление воды в системах ЦСТ | Объем систем/год | 45,7 | 49,0 | 44,7 | 0,3–1,9 | 0,4–0,7 | 0,8 |
| Тепловые потери | % | 7 | 5,2 | 5,7 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Доля аварий | км/год | 0,32 | 0,5 | 0,24 | 0,03–0,1 | 0 | 0,13 |

Целесообразно сравнивать системы теплоснабжения с близкими климатическими параметрами, именно поэтому сравним Россию, Данию, Швецию, Финляндию и Норвегию. Результаты анализа представлены в табл. 4 [6].

Таблица 4
Сравнительный анализ систем теплоснабжения

| Страна | Россия | Дания | Финляндия | Швеция | Норвегия |
|--------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Критерий сравнения | <i>Температурный график</i> | | | | |
| | 150/70 °C | 120/50 °C | 120/65 °C | 120/65 °C | 120/70 °C |
| | <i>Топливо, используемое для выработки тепловой энергии</i> | | | | |
| | Уголь, природный газ, жидкое топливо | Уголь, природный газ, жидкое топливо | Уголь, природный газ, торф и нефть | Природный газ, жидкое топливо | Сбросное тепло мусо- росжига- тельных заводов |
| | <i>Схема присоединения к тепловым сетям</i> | | | | |
| | Независимая | | | | |
| | <i>Стоимость тепловой энергии</i> | | | | |
| | 1200–1400 руб./Гкал | 1700 руб./Гкал | 2000–2500 руб./Гкал | 2500–3000 руб./Гкал | 3000–3400 руб./Гкал |

Заключение

Анализ развития систем централизованного теплоснабжения в странах Северной Европы показывает, что основными направлениями повышения эффективности теплофикации являются: использование комбинированной выработки теплоты и электрической энергии, а также парогазового цикла на источниках теплоснабжения; использование теплоты мусоросжигательных заводов; применение предварительно изолированных труб при прокладке или реконструкции трубопроводов централизованного теплоснабжения; снижение верхней температуры теплоносителя до 100–110 °C.

Децентрализованный или локальный способ теплоснабжения целесообразно применять для небольших населенных пунктов или поселков и мест с низкой концентрацией населения, удаленных от мощных источников теплоты. Для крупных городов преимущества в применении именно централизованного способа несомненны, особенно в районах плотной городской застройки. С повышением степени централизации повышается экономичность производства теплоты, снижаются ее потери при эксплуатации источников теплоснабжения и всей системы в целом.

Применение системы централизованного теплоснабжения для производства больших объемов теплоты позволяет эксплуатировать теплогенерирующее оборудование значительной единичной мощности, за счет чего повышается эффективность использования топлива и уменьшаются нерациональные потери теплоты в процессе подогрева теплоносителя.

Важным является экологический аспект развития централизованного теплоснабжения. Выбросы загрязняющих веществ от централизованной системы значительно меньше, чем суммарные выбросы от локальных систем аналогичной мощности. Это достигается благодаря концентрации сжигания топлива на небольшом количестве объектов, которые могут быть оборудованы комплексом газо-, водо- или золоочистки. Кроме того, крупные энергоисточники оборудуются, как правило, высокими дымовыми трубами для снижения приземной концентрации загрязняющих факторов.

Повышение эффективности централизованного теплоснабжения с использованием современных технологий должно обеспечить надежное и качественное снабжение потребителей тепловой энергией.

Список литературы

1. *Башмаков, И. А.* Анализ основных тенденций развития систем теплоснабжения в России и за рубежом / И. А. Башмаков // Центр по эффективному использованию энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cenef.ru/file/Heat.pdf>

2. Усынина, А. Э. Современное состояние систем теплоснабжения и водоподготовительного оборудования на теплоэнергетических объектах в России и за рубежом / А. Э. Усынина, Л. В. Боронина // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2012. – № 2 (3). – С. 121–127.
3. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации в 2016 г. – Москва : Минэнерго России, 2017. – 264 с.
4. Рафальская, Т. А. Исследование нарушений режимов работы тепловых сетей крупных систем теплоснабжения / Т. А. Рафальская // Теплоэнергетика. – 2017. – № 4. – С. 85–90.
5. Энергетика: История, настоящее и будущее / С. Г. Плачкова [и др.] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-3>
6. Актуализация схемы теплоснабжения в административных границах г. Ессентуки Ставропольского края на период с 2014 по 2028 год. – Ессентуки : ДЖИ «Динамика», 2016. – 26 с.
7. Схема теплоснабжения города Ростова-на-Дону до 2031 г. – Ростов-на-Дону : ОАО «Росгазификация», 2016. – 219 с.
8. ЭГ-10-13.УЧ-ПСТ.000.000.А-2016 Схема теплоснабжения города Екатеринбурга до 2030 г. – Екатеринбург, 2015. – 286 с.
9. Таблица сетевой воды от Казанских ТЭЦ на отопительный сезон 2017–2018 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tatenergo.ru/press/news/news_484.html?year=2017&v=1&PAGEN_2=3
10. 04401.СТ-ПСТ.000.000. Схема теплоснабжения г. Красноярск до 2033 г. – Красноярск, 2016. – 357 с.
11. Муниципальный контракт № 11-ГХ от 06.04.2016. Актуализация схем теплоснабжения муниципального образования городской округ город Сургут до 2026 г. – Сургут, 2016. – 135 с.

12. 22401.СТ-ПСТ.000.000. Схемы теплоснабжения города Нижнего Новгорода до 2031 г. – Нижний Новгород, 2016. – 494 с.
13. ЭНИН.ПСТ.000.000. Схема теплоснабжения города Томска до 2031 года. – Томск, 2016. – 271 с.
14. *Об утверждении* схемы теплоснабжения города Иванова : постановление от 01.04.2014 № 699 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ivgoradm.ru/news?nid=27602>
15. Актуализация схемы теплоснабжения города Перми (на период до 2032 года) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gorodperm.ru/actions/jkh/Razvitiie%20infrastrukturi/teplo/schema2017/>
16. *Об утверждении* схемы теплоснабжения муниципального образования город Новый Уренгой на перспективу до 2028 года. – Новый Уренгой, 2016. – 241 с.
17. Актуализация схемы теплоснабжения города Орла до 2030 года. – Орел, 2016. – 66 с.
18. *Об утверждении* схемы теплоснабжения города Магнитогорска на период 2012–2027 гг. : постановление администрации г. Магнитогорска от 28.11.2013 № 16180-П [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.magnitogorsk.ru/en/about-city/news/item/3833-skhemateplosnabzheniya.html>
19. Схема теплоснабжения города Омска до 2032 года. – Омск, 2017. – 198 с.
20. Актуализация схемы теплоснабжения города Смоленска до 2029 года. – Смоленск, 2016. – 26 с.
21. Актуализированная схема теплоснабжения города Самара до 2032 года. – Самара, 2016. – 400 с.
22. *Об утверждении* актуализированной схемы теплоснабжения муниципального образования города Кургана на период до 2028 года : постановление от 31.03.2015 № 2953. – Курган, 2017. – 303 с.

23. *Об утверждении актуализированной схемы теплоснабжения города Вологды до 2028 года на 2017 год* : постановление от 06.07.2016 № 800 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/46305214/>
24. *Об утверждении схемы теплоснабжения города Железногорска на период с 2013 года по 2027 год* : постановление администрации г. Железногорска Курской области от 22.07.2013 № 2608 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lawru.info/dok/2013/07/22/n693632.htm>
25. 50401.СТ-ПСТ.000.000. Схема теплоснабжения города Новосибирска до 2030 года. – Новосибирск, 2013. – 227 с.
26. Семенов, В. Г. Зарубежный опыт эксплуатации систем теплоснабжения / В. Г. Семенов // Энергосбережение. – 2005. – № 7. – С. 62–66.
27. Дураева, Е. Политика в сфере теплоснабжения: ситуация в России и опыт других стран / Е. Дураева // Новости теплоснабжения. – 2005. – № 2. – С. 15–19.

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

УДК 69.003.13

НАДЕЖНОСТЬ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРОЕКТНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Г.Б. Сафарян^{*}, В.В. Герасимов^{}**

Разработаны основы системотехники инженерного менеджмента на основе принципов инженерного конструирования и решений менеджмента по реализации объектов строительства в условиях бизнеса. Основой подхода является формирование параметров информационного моделирования технологии связывания параметров организационно-технологических решений объектов и процессов производства с проектным комплексом объектов строительства. Надежность комплекса этих решений определяется интегрированной оценкой, включаемой в систему управления строительства. Использование модельного комплекса управления позволяет формировать достоверные решения стратегических документов развития строительного кластера.

Ключевые слова: методология, инженерное конструирование, менеджмент, эффективные решения.

Введение

Основной задачей программирования развития объектов территориальных строительных систем (ТСС) является формирование стандартов и шаблонов проектов, создающих кванты ресурсов, ориентированных на обеспечения надежного результата развития. Формообразование этих стандартов может быть представлена информационными квантами в форматах проектов. При этом в понятие квантов включается модуль ресурсов,

^{*} Аспирант кафедры технологии и организации строительства НГАСУ (Сибстрин)

^{**} Д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и организации строительства НГАСУ (Сибстрин)

ориентированная на реализацию результата развития производства территориальной системы [1–4].

Целью работы является исследование методологии разработки системотехники инженерного менеджмента, в рамках которого осуществляется динамический процесс формирования процессов, структур и механизмов системы строительного производства на основе знаниевых технологий их эффективного использования.

Актуальность работы определяется недостаточной разработанностью методических основ надежности организационных решений в области проектирования строительных объектов.

Методика исследования

Исследование надежности программирования организационно-технологических решений включало работы по формированию задач эффективного программирования решений, разработки модели программирования решения, разработки моделей надежности строительных проектов. В качестве инструментов исследований принимался комплекс методов информационного управления, включающий гипертекстовое моделирование, логико-функциональный и многопараметрический анализ.

В качестве объектов исследования принимались проектные формы – проект, портфель, программа.

В рамках проектов отражаются возможности решения локальных проблем развития в форматах типов проектов (экономические, социальные, экологические, научно-исследовательские) и видов (инвестиционные, инновационные, организационные, информационные проекты). В рамках проектов осуществление решений локальных целей при технологии специализированных проектов; портфелей – комплексных проектов в локальных территориях; программ – портфелей и проектов в территории.

В качестве методологического подхода исследования принималась технология надежности, ориентированная на результат (НОР), которая позволяет осуществлять корректировку проектных квантов – распределенных ресурсных модулей с учетом данных нормативной базы критериев надежности, определен-

ных экспериментальными исследованиями. Матрица использования технологий НОР в пространстве проектных образований приведена в табл. 1.

Таблица 1
Матрица использования технологий НОР

| TX-НОР | РНН | ИНН | УРНН |
|--------|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| ИФ | + | | |
| РСП | | + | |
| РОИ | | | + |
| ИН | Вероятности отклонений и изменений | Надежности параметров системы | Области безопасности результатов |
| МД | Статистических испытаний | Стохастическое проектирование | Зонирование опасностей |

Примечание. TX-НОР – технологии НОР; ИФ – исследование факторов РСП – разработка стохастических проектов; РОИ – регулирование отклонениями и изменениями; ИН – инструменты; МД – методы; РНН – разработка норматива надежности; ИНН – использование норматива надежности; УРНН – управление результатами через нормативы надежности.

Модель проектного программирования стохастических решений в НОР позволяет осуществлять классификацию нормативов надежности рабочих параметров ТСС (табл. 2).

Проект-объект представляет собой комплекс мероприятий по обеспечению ресурсами модели объекта, а его надежность определяется матрицей «параметр – надежность».

Модель проекта имеет вид:

$$По = U(Tп = f(o), Bп = f(o)); \quad (1)$$

$$Пр = US(Tп = f(s), Bп = f(s)); \quad (2)$$

$$Нд(По) = M(Hд(Tп)^Hд(Bп)); \quad (3)$$

$$Нд(Пр) = M(Hд(Tп(S))^Hд(Bп(S))), \quad (4)$$

где По – проект–объект; Тп = f(o) – тип проекта как функция особенностей объекта; Вп = f(o) – вид проекта как функция особенностей объекта; Пр – проект развития; S – стратегия; Вп = f(s) – вид проекта как функция стратегии; Тп(S) – тип проекта как функция особенностей стратегии; Вп(S) – вид проекта как функция стратегии; М – индекс матрицы.

Таблица 2
Модель проектного программирования
стохастических решений в НОР

| Уровни проектов | Территория | Кластер | Предприятие |
|-----------------|------------|-----------|-------------|
| Пг | Nпг(UNпф) | Nпг(USпг) | Nпг(UCпг) |
| Пф | Nпф(UNпт) | Nпф(USпф) | Nпф(UCпф) |
| Пт | NптUNпм) | Nпт(USпм) | Nпт(CUпт) |

Примечание. Пг, Пф, Пт – соответственно программа, портфель, проект; Nпг(UNпф) – норматив надежности программы как множество нормативов портфеля; Nпг(US(Пг) – норматив надежности программы как множество стратегий программ; Nпг(UCпг) – норматив надежности программы как множество структурных форм программы; пм – проектный модуль.

Проект-развитие определяется формой изменений в рамках ТСС, а его надежность – матрицей «стратегия–система» (табл. 3).

Портфельный проект представляет собой комплекс проектов по вариантам специализации – типам и видам проектов, а его надежность определяется матрицей «проект–надежность».

Модель портфеля имеет вид:

$$\Pi\phi = U(T_p, B_p, T_p^{\wedge}B_p); \quad (5)$$

$$\Pi\phi = US(T_p, B_p, T_p^{\wedge}B_p); \quad (6)$$

$$Hd(\Pi\phi) = M (Hd T_p, B_p, T_p^{\wedge}B_p), \quad (7)$$

где Пф – портфель проектов.

Таблица 3
Проектное программирование развития ТСС (пример)

| Стра-тегия | Система | | | Характеристика проектных квантов |
|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| | Структура – объем ресурсов | Процесс – поток ресурсов | Функции – управление ресурсами | |
| S1 | + | | | Кпр1(Рс) |
| S2 | | + | | Кпр2(КРс) |
| S2 | | | + | Кпр3(КРс) |
| S4 | + | + | + | Кпр4(КРс) |

Примечание. S – стратегия; Кпр – проектный квант; КРс – комплекс ресурс проекта.

Портфель проект-развитие определяется формой изменений в рамках ТСС, а его надежность – матрицей «стратегия–система» (табл. 4).

Таблица 4
Портфельное программирование развития ТСС (пример)

| Стра-тегия | Система | | | Характеристика портфельных квантов |
|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| | Структура – объем проектов | Процесс – поток проектов | Функции – управление проектами | |
| S1 | + | | | Кпф1(ТП1^ВП1) |
| S2 | | + | | Кпф2(ТП2^ВП2) |
| S2 | | | + | Кпф3(ТП3^ВП3) |
| S4 | + | + | + | Кпф4(ТП4^ВП4) |

Примечание. Кпф – портфельный квант; ТП1 – экономический проект; ТП2 – социальный проект; ТП3 – экологический проект; ТП4 – научно-исследовательский экономический проект; ВП1 – инвестиционный проект; ВП2 – инновационный проект; ВП3 – организационный проект; ВП4 – информационный проект.

Программный проект представляет собой комплекс проектов и портфелей по смешанной схеме специализации, а его надежность определяется матрицей «проект – портфель – надежность».

Модель портфеля имеет вид:

$$\Pi_g = U(\Pi \phi^{\wedge} \Pi p); \quad (8)$$

$$\Pi_g = US(\Pi \phi^{\wedge} \Pi p); \quad (9)$$

$$H_d(\Pi_g) = M : H_d((\Pi \phi^{\wedge} \Pi p)), \quad (10)$$

где Π_g – программа проектов.

Проект – развитие определяется формой изменений в рамках ТСС, а его надежность – матрицей «стратегия–система» (табл. 5)

Таблица 5
Программное программирование развития ТСС (пример)

| Стра- тегия | Система | | | Характеристика программных квантов |
|----------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| | Структура – объем портфелей | Процесс – поток портфелей | Функции – управле- ние порт- фелями | |
| S1 | + | | | Kpg1(TP1^VP1) |
| S2 | | + | | Kpg2(TP2^VP2) |
| S2 | | | + | Kpg3(TP3^VP3) |
| S4 | + | + | + | Kpg4(TP4^VP4) |

Примечание. Кpg – программный квант.

В результате проведенного исследования проектных данных по строительному комплексу города получены:

- 1) модельный комплекс программирования организационно-технологических решений и надежности строительных проектов;
- 2) методические регламенты программирования организационно-технологических решений и надежности строительных проектов;
- 3) методические регламенты по управлению преобразованиями параметров строительных портфелей проектов и программ.

Согласование с известными данными

Результаты исследований по программированию организационно-технологических решений строительного проектирования территориальных объектов [2] дополнено развитием знаний в области учета факторов надежности и риска.

Заключение

Анализ моделей показывает, что программирование организационно-технологических решений проектных форм позволяет осуществить разработки стохастической проектной документации, что создает возможности разработки планов и бюджетов с учетом факторов неопределенности и риска.

Модельный комплекс может быть применен при разработке мегапроектов строительства множества объектов с распределенной схемой их организации по территории.

Список литературы

1. Швецов, В. А. Организационно-технологические условия и факторы управления региональным комплексом инвестиционно-зависимых отраслей / В. А. Швецов // Известия КГАСУ. – 2005. – № 1 (3).– С. 98–101.
2. Эффективность системотехники организационно-технологических решений строительных объектов / В. В. Герасимов, О. А. Коробова, Г. К. Щепотин, О. Ю. Михальченко // Известия вузов. Строительство. – 2014. – № 1. – С. 49–56.
3. Проблемы теории и практики формирования эффективной системы управления строительным производством на базе научно-технического прогресса / А. Г. Магомедов [и др.]. – Москва : Эконом, 2012. – 112 с.

ПЕДАГОГИКА, ПОДГОТОВКА КАДРОВ В ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ

УДК 811.511.115 : 81'367.335.2 : 81'366.596

МАЛЫЙ ЯЗЫК В РОССИИ (НА ПРИМЕРЕ ВЕПССКОГО ЯЗЫКА)

Г.П. Иванова^{*}, С.И. Рудяк^{}**

Рассматриваются проблемы сохранности языка вепсской народности в условиях естественного доминирования русского языка. Ставится цель оценить ситуацию с вепсским языком с начала XX в. и до наших дней в районах исконного проживания вепсов и в местах их переселений. Актуальность исследования обусловлена необходимостью привлечь внимание к будущему вепсского народа и его языку. Предлагаются меры по сохранению этого языка. Особо выделяется такой фактор сохранения языка, как отношение членов национального сообщества к языку предков, преданность ему.

Ключевые слова: прибалтийско-финские языки, малые языки, вепсский язык, языковая ситуация.

Введение

Языки – это часть культурного наследия человечества. Культура каждого народа, даже самого малочисленного, является частицей мирового культурного опыта. Сохранение и развитие, а не утрата важны для всего просвещенного человечества.

В многонациональной России существует более 150 языков. Из них малочисленных – около сорока. Они относятся к одной из четырех языковых семей: индоевропейской, алтайской, уральской или северокавказской.

Вепсский язык принадлежит к уральской языковой семье, финно-угорской группе, прибалтийско-финской подгруппе, в которую входят также финский, эстонский, карельский, ижорский, водский и ливский языки.

^{*} Канд. филол. наук, доцент кафедры русского языка НГАСУ (Сибстрин)

^{**} Канд. филол. наук, профессор кафедры русского языка НГАСУ (Сибстрин)

Статья посвящена проблемам сохранения языка одной из малых народностей России – вепсов, проживающих на юге Карелии, в Вологодской и Ленинградской областях. Территорией исконного проживания вепсов является район треугольника, ограниченного Ладожским, Онежским и Белым озерами. Численность вепсов по переписи 1989 г. составляла 12,5 тыс. человек, по переписи 2002 г. – 8,2 тыс. человек. Согласно переписи 2010 г. их число сократилось до 5,9 тыс. человек [1, с. 97]. В настоящее время на родном языке говорят в основном представители старшего поколения вепской народности. Численность людей, причисляющих себя к вепсам, неуклонно сокращается из-за убывания пожилого населения. В 2009 г. вепсский язык был включен ЮНЕСКО в атлас исчезающих языков мира как «находящийся под серьезной угрозой исчезновения» [10].

Возраст вепсского языка и языковые контакты вепсов

У каждой семьи языков есть общий язык-предок. Такой язык у вепсов выделился из праpriбалтийско-финского языка во второй половине I тысячелетия. По общепринятым мнению, прибалтийско-финские языки восходят к общему праязыку, на котором говорила общность прибалто-финнов на территории, прилегающей к Финскому и Рижскому заливам, в середине II – начале I тыс. до н.э. Прибалто-финны контактировали с балтами – предками современных литовцев и латышей. На прибалто-финнов во второй половине I тыс. до н.э. – первых веках н.э. оказали языковое, экономическое и культурное влияние германские народы (предки шведов, норвежцев, немцев).

VI–VIII в. н.э. – это время освоения северных территорий русскими. Начало многовековых славяно-финских контактов относится к предгосударственному периоду русской истории. Славяно-финские связи, определившие раннюю ассимиляцию финноязычных обитателей ядра Новгородско-Псковской земли, выявлены в погребальных памятниках второй половины I тыс. н.э. – сопках и длинных курганах [2, с. 237]. Расселение на этой территории крупных масс, в которых преобладал славянский эт-

нос, послужило импульсом для распада прибалтийско-финской общности на отдельные этноязыковые образования [3, с. 14]. Вепсы выделились на территории южного Приладожья и в I тысячелетии начали передвигаться в северо-восточном направлении в сторону Белого озера. Во второй половине I тысячелетия вепсы осели в Межозерье – территории, которая стала местом их основного проживания.

С образованием Древнерусского государства вепсы вошли в его состав. Важными итогами освоения русскими северных земель были христианизация вепсов и их миграции. Миграции привели к закреплению «чеснеполосного» расселения вепсов, т.е. к разделению единого народа на отдельные группы и подгруппы. Следствием стала языковая дифференциация среди вепсов. Переселившиеся на земли западного побережья Онежского озера стали носителями северного диалекта, осевшие в центральной части Межозерья сформировали средневепсский диалект, а ушедшие в район Тихвина и Бокситогорска – южновепсский диалект.

Межэтнические контакты русских и вепсов вели к полной или частичной ассимиляции последних. Деэтнологизация большинства финноязычных племен развернулась в древнерусскую эпоху и продолжалась до конца XX в. К домонгольскому периоду относится глубокая славянизация – усвоение славянских культурных черт неславянскими народами – чудских обитателей центральных и западных районов Новгородской земли, летописных мери в Волго-Клязьменском междуречье, веси в Белозерье, муромов в среднем течении Оки, а также финно-угров Рязанского Поочья [2, с. 240].

Процесс славянизации вепсов в одних местах полностью завершился (центральные и западные районы Новгородской земли), на других территориях продолжается и сегодня (Карелия, Ленинградская и Вологодская области).

События российской истории XX в., смена государственного строя, коллективизация, массовые репрессии 1937–1938 гг., Великая Отечественная война, политика по созданию единой

общности «советский народ», ликвидация неперспективных сел и деревень – все это разрушительно действовало на численность вепсов. Поэтому ситуация с вепсским языком к началу XXI в. предстает как массовый переход вепсов с языка своей народности на русский язык в течение 100 лет.

Причины, губительно влияющие на витальность языков

Причины, приводящие к утрате языка этноса, общеизвестны: это резкое уменьшение численности народа – носителя языка, его переселение, миграции, экономические причины, в том числе промышленное развитие территории, изменение брачных моделей, политическая и культурная дискриминация, разрушение культуры этноса, низкий социальный статус языка. Кроме того, на судьбу языка влияют социальные и демографические факторы: размер группы, уровень рождаемости, географическая плотность населения, степень урбанизации, особенности отношения носителей к языку использования, политика правительства и др. [4].

Рассмотрим основные причины, губительно повлиявшие на жизнеспособность вепсского языка.

1. *Переселения*. По переписи 1897 г. вепсов (лиц с «чухарским» родным языком) было 25,6 тыс. человек. По переписи 1920 г. на той же территории насчитывалось уже всего около 5 тыс. вепсов [5]. Столь стремительная убыль населения связана с массовым переселением вепсов в Сибирь в начале XX в. Многие вепсские семьи по Столыпинской реформе добровольно отправились в Сибирь осваивать пустошные земли. Во-первых, было желание получить в частную собственность значительное количество земли, а во-вторых, повторяющиеся из года в год неурожай вынуждали оставлять обжитые родные места. Деревни Мардай и Высотский Аларского района, Жизневка и Мягчинский Заларинского района Иркутской области были заселены большей частью вепсами. Когда-то здесь были большие кол-

хозы, сейчас эти деревни находятся на грани исчезновения: в каждой по 4–5 домов с нулевой инфраструктурой [6, с. 239].

В 60-х гг. XX в. СССР взял курс на ликвидацию неперспективных деревень, а так как вепсы традиционно были заняты в сельском хозяйстве, то вепсские деревни первыми были обречены на переселение. С 1953 по 1958 г. из Вологодской области было полностью выселено население шести вепсских сельских Советов [7]. Из вепсских деревень Аларского района Иркутской области большинство трудоспособного населения вынуждено было переехать в город.

2. *Смешанные браки*. В связи с переселением на территории с преобладанием невепсского населения неизбежными стали такие браки.

3. *Увеличение русского окружения*. Это привело к потере передачи языка молодому поколению – главному симптому гибели языка.

4. *Политическая и культурная дискриминация*. В период развитого социализма вепсов объявили «несуществующими» в официальной статистике, и поэтому при проведении переписи населения записывали их русскими. В результате такой дискриминации по переписи 1970 и 1979 гг. в Ленинградской и Вологодской областях людей вепсской национальности зафиксировано не было, что нанесло огромный удар по национальному достоинству вепсов и деформировало их национальное самосознание [7].

5. *Кампания по ликвидации национальных школ в местах проживания вепсов и преподавания на родном языке*. Со второй половины 1930-х гг. обучение в национальных школах Ленинградской области было переведено на русский язык с исключением всех сведений об истории, культуре и языке вепсского народа.

6. *Уровень образования*. Большинство вепсов малообразованы, и по причине низкого образовательного уровня они занимают самые непrestижные рабочие места, имеют низкую за-

работную плату, лишены качественного медицинского обслуживания, вследствие чего резко увеличивается их смертность.

7. *Билингвизм*. Основная функция языка – быть средством общения. Вепсский язык вытеснен на периферию, и таким средством перестал быть.

Политика государства в отношении языков малочисленных народов

Политика молодого Советского государства была направлена на развитие национальных меньшинств, преодоление национального неравенства между «передовыми» и «отсталыми» народами. С начала 1920-х – до середины 1930-х гг. создавались районные национальные Советы, готовились кадры вепсской национальности для работы в местных органах власти. Была создана письменность для вепсского языка. Она была разработана на латинской графической основе. В основу письменного языка был положен средневепсский диалект. В 1932 г. на нем начали проводить занятия в школах Ленинградской области, расположенных в местах компактного проживания вепсов. Издавались школьные учебники, книги, вышел небольшой вепсско-русский словарь.

Однако в конце 1930-х гг. национально-языковая политика в СССР резко изменилась. Руководство страны объявило существование национальных школ вредным и опасным. С конца 1938 г. преподавание на вепсском языке в школах было прекращено. Изданные в 1930-х гг. учебники на вепсском языке, изымались и уничтожались. Запрет на использование вепсской письменности затронул и проведение официальных культурных мероприятий. Однако общение на родном языке еще оставалось основным в вепсских деревнях [8, с. 112].

Только с середины 1980-х гг. стал вновь пробуждаться интерес к культуре и языку вепсской народности. Впервые вопросы национального развития вепсов были рассмотрены в 1988 г. на региональном совещании «Вепсы: проблемы развития экономики и культуры в условиях перестройки». С этого времени

в средствах массовой информации стали появляться публикации о тяжелой ситуации, в которой оказался к концу XX в. вепсский народ. Наряду с экономическими и социальными проблемами важной называли положение вепсского языка. Были приняты законы и постановления с целью поддержать вепсский народ экономически и социально, защитить его язык от гибели. Существенным итогом деятельности по сохранению вепсской народности стало присвоение вепсам статуса коренного малочисленного народа. В 1991 г. появился Федеральный закон № 1807 «О языках национальностей Российской Федерации», который давал республикам возможность иметь свой собственный государственный язык, помимо русского. Другим важным законодательным актом явился Федеральный закон «О государственном языке России», принятый в 2005 г. В соответствии со ст. 68.3 и 69 языки небольших меньшинств, такие как вепсский, пользуются особой защитой.

В конце 1980-х гг. была возрождена вепсская письменность, был восстановлен алфавит, как и в первый период, на основе латинской графики. В настоящее время разработана концепция общевепсского нормированного языка, на котором составляются учебники для начальной и средней школы, вепсский язык преподается в нескольких вузах; один раз в месяц выходит газета «Kodima» на вепсском языке (параллельно с русским вариантом), ведутся радио- и телепередачи. Тем не менее, язык практически утратил главную функцию – быть средством общения, а число носителей постоянно убывает.

Сейчас вепсской интеллигенцией предпринимаются меры по сохранению родного языка. Эти меры направлены на создание условий для передачи языка детям, на поддержку образования, средств массовой информации на вепсском языке. Вепсский язык в основном преподается в качестве факультативного предмета. Говорят о необходимости включить вепсский язык в сферу образования: в школах должно быть введено преподавание на вепсском языке. Следует сделать доступными электронные средства массовой информации на вепсском языке,

увеличить продолжительность и частоту трансляции теле- и радиопрограмм. Эти меры помогут укрепить общественный престиж вепсского языка.

В отчете ELDIA [9] дан исчерпывающий анализ социолингвистической ситуации у вепсов, изложены результаты проведения исследований с участием нескольких языковых групп и их интервьюирования. Респонденты из группы вепсского меньшинства рассматривали перспективы вепсского языка с большой долей неуверенности. Большинство из них считают, что в ближайшие десять лет возрастет употребление русского и английского языков. Вместе с тем, респонденты из вепсского меньшинства одобряют деятельность организаций и отдельных людей, которые стремятся сохранить вепсский язык. В деле сохранения языка важную роль играет отношение людей к критической ситуации с родным языком.

Языки исчезали на протяжении всей истории человечества. Поэтому часто утверждают, что смерть языков – это естественный процесс: языки, как и люди, рождаются и умирают, более слабые исчезают, а выживают сильнейшие. Суждения и даже теории о том, что процесс умирания языков якобы носит «естественный» характер и что ему не надо препятствовать, по сути означают попытку обоснования идеологии лингвоцида и этноцида.

Для защиты редких и исчезающих языков ЮНЕСКО издало «Атлас языков мира, находящихся под угрозой исчезновения» («Красную книгу»). В «Красной книге» исчезающих языков степень сохранности языка определяется на основе девяти факторов, из которых самым важным является передача языка между поколениями. В зависимости от этого языку присваивается один из следующих статусов:

- *безопасный*: на языке говорят многие поколения, передача языка не прерывается (такие языки не занесены в «Красную книгу»);

- *уязвимый*: на языке говорит большинство детей, но его распространение может ограничиваться несколькими областями (например, язык употребляется только дома);
- *под угрозой*: дети дома уже не учат язык как родной;
- *серьезно уязвимый*: на языке говорит старшее поколение; поколение родителей может его понимать, но не говорит на нем с детьми или между собой;
- *критически уязвимый*: самыми молодыми носителями являются старые люди, которые говорят на языке только частично и редко;
- *вымерший*: носителей уже не существует (в «Красную книгу» занесены только языки, вымершие до 1950-х гг.) [10].

Статус вепсского языка на сегодняшний день оценивается как «серьезно уязвимый» – на языке говорит старшее поколение; поколение родителей может его понимать, но не говорит на нем с детьми или между собой.

Меры по сохранению вепсского языка

В современной ситуации для сохранения языка и развития культуры вепсского народа необходимыми представляются следующие мероприятия:

1. Обеспечить подготовку, переподготовку, повышение квалификации преподавателей дошкольного, среднего и профессионального образования.
2. Ввести обязательное изучение вепсского языка в дошкольных учреждениях, в школах – независимо от наполняемости групп и классов. Для создания мотивации к изучению национального языка рассмотреть возможность включения в программу ЕГЭ «Вепсский язык» и учитывать результат экзамена при поступлении в вузы, трудоустройстве и дальнейшей социализации.
3. Популяризовать традиционную среду и культуру вепсов: проводить фестивали, создавать этноцентры, национальные общества.

4. Развивать и поддерживать экономически (с обеспечением льгот и преференций) традиционную хозяйственную деятельность вепсов: обработку камня, дерева, рыбную ловлю, народные промыслы и ремесла для увеличения занятости населения.
5. Содействовать созданию продукции (искусство, кино, телевидение, интернет), популяризирующей традиционную культуру вепсов и поддерживающей социально-культурные функции вепсского языка.
6. Поддерживать носителям вепсского языка и культуры свое этническое своеобразие, в первую очередь – язык.

Список литературы

1. *Письменные языки мира: Языки Российской Федерации. Социолингвистическая энциклопедия*. – Москва : Академия, 2003. – Кн. 2. – С. 97–113.
2. *Рябинин, Е. А. Финно-угорские племена в составе Древней Руси / Е. А. Рябинин*. – Санкт-Петербург, 1997. – 260 с.
3. *Седов, В. В. Прибалтийско-финская этноязыковая общность и ее дифференциация / В. В. Седов // Финно-угроведение*. – 1997. – № 2. – С. 3–14.
4. *Кибрик, А. Е. О факторах, отрицательно влияющих на жизнеспособность языков малочисленных народов / А. Е. Кибрик // Русский язык и языки народов Крайнего Севера: Проблемы описания контактных явлений : тез. докладов*. – Ленинград, 1991.
5. *Строгальщикова, З. И. Вепсы. Очерки истории и культуры. Документирование языка / З. И. Строгальщикова*. – Санкт-Петербург, 2014. – 284 с.
6. *Иванова, Г. П. Социолингвистическая ситуация в вепсском языке на территории Сибири / Г. П. Иванова // Языки коренных народов Сибири*. – 2006. – Вып. 18. – С.239–256.
7. *Вепсы: модели этнической мобилизации : сборник материалов и документов / Е. И. Клементьев [и др.] ; Карельский научный центр*. – Петрозаводск, 2007. – 336 с.

8. *Башкарев, А. А. Языковая политика властей СССР по отношению к вепсам в 1930-х годах / А. А. Башкарев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Гуманитарные и общественные науки. – 2012. – № 2 (148). – С. 110–113.*
9. *Вепсский язык в России. Подробный отчет ELDIA / У. Пуура [и др.] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://go.mail.ru/redir?via_page=1&type=sr&redir=eJzLKCkpsNLXT0tNyS9K1CvISMxMAdKleZllmal6icl6iSVQOf301BL9fCtjQ1NTE3P9pJTUNCvn_LyS1LwSkAwDg6GpoZmFiYm5oSID4xvH9TPFU7wFHJj5a1panAHIZiDX*
10. *Атлас языков мира, находящихся под угрозой исчезновения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.unesco.org/new/ru/culture/themes/endangered-languages/atlas-of-languages-in-danger/>*