

ISSN 2227—1384

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ПРИАМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ШОЛОМ-АЛЕЙХЕМА»



ВЕСТНИК

ПРИАМУРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. ШОЛОМ-АЛЕЙХЕМА

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ

*основан в 2008 году
выходит четыре раза в год*

№ 4(29) 2017

ISSN 2227-1384

MINOBRNAUKI ROSSII
(THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
OF THE RUSSIAN FEDERATION)

Federal'noe gosudarstvennoe biudgetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie
vysshego obrazovaniya
«PRIAMURSKII GOSUDARSTVENNYI UNIVERSITET IMENI SHOLOM-ALEICHEMA»

(Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«SHOLOM-ALEICHEM PRIAMURSKY STATE UNIVERSITY»)



VESTNIK
PRIAMURSKOGO GOSUDARSTVENNOGO
UNIVERSITETA IMENI SHOLOM-ALEICHEMA
(SHOLOM-ALEICHEM PRIAMURSKY STATE
UNIVERSITY BULLETIN)

NAUCHNO-OBRAZOVATEL'NYI ZHURNAL
(SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL JOURNAL)

osnovan v 2008 godu
vykhodit chetyre raza v god

(founded in 2008
is issued four times a year)

№ 4(29) 2017

УЧРЕДИТЕЛЬ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Н. Г. Баженова, кандидат педагогических наук, доцент — главный редактор,
П. Н. Толстогузов, доктор филологических наук, профессор — зам. главного редактора,
В. В. Николаева — ответственный секретарь.

Н. М. Байков, доктор социологических наук, профессор (Хабаровск, Россия),
С. В. Березницкий, доктор исторических наук, профессор (Санкт-Петербург, Россия),
И. М. Воротилкина, доктор педагогических наук, профессор (Биробиджан, Россия),
В. Л. Земляк, кандидат физико-математических наук (Биробиджан, Россия),
Е. О. Клинская, кандидат биологических наук, доцент (Биробиджан, Россия),
В. М. Козин, доктор технических наук, профессор (Комсомольск-на-Амуре, Россия),
О. Л. Коноваленко, кандидат юридических наук, доцент (Биробиджан, Россия),
Б. М. Котлерман, доктор философии (PhD), профессор (Рамат-Ган, Израиль),
В. И. Пятак, кандидат философских наук, доцент (Биробиджан, Россия),
Б. Е. Фишман, доктор педагогических наук, кандидат физико-математических наук, профессор (Биробиджан, Россия),
Е. Я. Фрисман, член-корреспондент Российской академии наук, доктор биологических наук, профессор (Биробиджан, Россия),
О. Е. Шаповалова, доктор психологических наук, профессор (Биробиджан, Россия),
В. Г. Шведов, доктор географических наук, доцент (Биробиджан, Россия),
В. Т. Шишмаков, доктор экономических наук, профессор (Хабаровск, Россия).

Ответственный за номер — к. ф.-м. н. В. Л. Земляк

Литературный редактор — к. филол. н. Л. Н. Капуцына,
технический редактор — В. В. Николаева

Адрес в Интернете: <http://pgusa.ru/ru/vestnik>

Адрес редакции: 679015, г. Биробиджан, ул. Широкая, 70-А. Тел. 4-63-69, e-mail: bir.izdatel@gmail.com

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР).
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-66783 от 08.08.2016.

Полное или частичное воспроизведение материалов допускается только с разрешения редакции.
Ссылка на журнал обязательна.

Подписано в печать 29.09.2017. Дата выхода в свет 29.12.2017. Формат 70×100 ¹/₁₆. Бумага офисная.
Усл. печ. л. 7,50. Уч.-изд. л. 6,63. Тираж 500 экз. Заказ № 81/2017. Свободная цена.

Издательский центр Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема
679015, г. Биробиджан, ул. Широкая, 70-А

Отпечатано в типографии Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема
679015, г. Биробиджан, ул. Широкая, 70-А

PARENT ORGANIZATION

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Sholom-Aleichem Priamursky State University»

EDITORIAL BOARD

N. G. Bazhenova, PhD (pedagogics), associate professor — Editor-in-Chief,
P. N. Tolstoguzov, DSc (philology), full professor — Deputy Editor-in-Chief,
V. V. Nikolayeva — Executive Secretary.

N. M. Baykov, DSc (sociology), full professor (Khabarovsk, Russia),
S. V. Bereznitskiy, DSc (history), full professor (Saint-Petersburg, Russia),
I. M. Vorotilkina, DSc (pedagogics), full professor (Birobidzhan, Russia),
V. L. Zemlyak, PhD (physical and mathematical), associate professor (Birobidzhan, Russia),
E. O. Klinskaya, PhD (biology), associate professor (Birobidzhan, Russia),
V. M. Kozin, DSc (engineering), full professor (Komsomolsk-na-Amure, Russia),
O. L. Konvalenko, PhD (science of law), associate professor (Birobidzhan, Russia),
B. M. Kotlerman, PhD (study of culture), full professor (Ramat-Gan, Israel),
V. I. Pyatak, PhD (philosophy), associate professor (Birobidzhan, Russia),
B. E. Fishman, DSc (pedagogics), full professor (Birobidzhan, Russia),
E. Ya. Frisman, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, DSc (biology),
full professor (Birobidzhan, Russia),
O. E. Shapovalova, DSc (psychology), full professor (Birobidzhan, Russia),
V. G. Shvedov, DSc (geography), associate professor (Birobidzhan, Russia),
V. T. Shishmakov, DSc (economics), full professor (Khabarovsk, Russia).

Executive Editor — **V. L. Zemlyak**, PhD (physical and mathematical)

Text Editor — **L. N. Kaputsina** (PhD, philology),
Technical Editor — **V. V. Nikolayeva**.

Internet address: <http://pgusa.ru/en/vestnik>

Editorial Office address: 679015, Russian Federation, Birobidzhan (city), Shyrokaya st., 70-A.
Phone: (42622) 4-63-69, e-mail: bir.izdatel@gmail.com

The journal is registered in Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom,
Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR).
Certificate of registration PI No. FS 77-66783 of 08/08/2016.

Total or partial reproduction of the journal materials without permission of the publisher is prohibited.
Links to the journal is obligatory.

Signed for print 29.09.2017. Issued 29.12.2017. Format 70×100 1/16. Office paper.
Conv. printer's sheet 7,50. Publish. sheet 6,63. Number of copies 500. Order No. 81/2017. Free price.

Publishing Centre of Sholom-Aleichem Priamursky State University
679015, Birobidzhan (city), Shyrokaya st., 70-A

Printed in printing office of Sholom-Aleichem Priamursky State University
679015, Birobidzhan (city), Shyrokaya st., 70-A

Содержание

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ.....	9
Афанасьев А. П., Борисова С. Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ КРУПНЫХ ПТИЦ НА СТАТИСТИКУ АВАРИЙНЫХ ОТКЛЮЧЕНИЙ ВЛ-110 КВ	9
Бирюков А. Ф., Афанасьев А. П. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ТРЁХФАЗНЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ СКОЛЬЖЕНИЯ	17
Земляк В. Л., Козин В. М., Баурин Н. О., Радионых С. В., Коновалов И. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ ДВИЖЕНИЯ ПОГРУЖЁННОГО ТЕЛА	23
Земляк В. Л., Козин В. М., Рогожникова Е. Г., Радионых С. В., Коновалов И. А. ВЛИЯНИЕ ТРЕЩИН И РАЗВОДИЙ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВОЗБУЖДАЕМЫХ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ОТ ДВИЖЕНИЯ ПОГРУЖЁННОГО ТЕЛА	31
Канделя М. В., Назарова В. П. АППАРАТ РЕЖУЩИЙ ЖАТВЕННОЙ МАШИНЫ	43
Канделя М. В., Назарова В. П. УСТРОЙСТВО МОЛОТИЛЬНОЕ ДВУХБАРАБАННОЕ	50
Одинокова О. А., Доко А. А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДРЕВЕСИНЫ	55

Смирных И. Ю., Афанасьев А. П. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА RastrWin3 ПРИ РЕШЕНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАДАЧ В СЕТЯХ 6 – 10 кВ	61
Шлыков В. А., Афанасьев А. П. ПРОБЛЕМА ВЫБОРА ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО РЕЖИМА ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ В СЕТЯХ С НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 кВ.....	67
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ	73
Афанасьев А. П., Собоженко К. А. ИМИТАЦИОННАЯ SIMULINK МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РЕЛЕ	73
Лапшина С. В., Шаповалов В. М. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТЕЧЕНИИ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ.....	79
Мазина Н. А., Бойчин Р. Е., Васильев А. С., Земляк В. Л. ПРИМЕНЕНИЕ САПР-СИСТЕМЫ REVIT STRUCTURE ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ЗДАНИЙ И ЭКСПОРТ ДАННЫХ В РЕШАТЕЛЬ ЛИРА САПР	91
Серёгин С. В. ВЛИЯНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ И ЖЁСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК	97
Тарануха Н. А., Резниченко А. Ю., Васильев А. С. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ УСИЛЕНИЯ	104
Порядок публикации статей в журнале	116

Contents

TECHNICAL SCIENCE	9
Afanasev A. P., Borisova S. I. A STUDY OF THE INFLUENCE OF LIFE OF LARGE BIRDS ON THE STATISTICS OF OUTAGES VL-110 kV	9
Birykov A. F., Afanasyev A. P. ENERGY-EFFICIENT CONTROL OF FREQUENCY- REGULATED THREE-PHASE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF MINING EQUIPMENT BY THE METHOD OF SLIP COMPENSATION	17
Zemliak V. L., Kozin V. M., Baurin N. O., Radionov S. V., Konovalov I. A. THE RESEARCH ON DEFORMED STATE OF ICE COVER WITH NON-STATIONARY MOTION MODE OF A SUBMERGED BODY	23
Zemliak V. L., Kozin V. M., Rogozhnikova E. G., Radionov S. V., Konovalov I. A. INFLUENCE OF CRACKS AND ICE FRACTURE ON INTENSITY OF EXCITED BENDING-GRAVITATIONAL WAVES FROM THE MOTION OF A IMMERSED BODY	31
Kandelya M. V., Nazarova V. P. THE CUTTING APPARATUS OF A REAPING MACHINE	43
Kandelya M. V., Nazarova V. P. THE DOUBLE-DRUM THRESHING DEVICE.....	50
Odinokova O. A., Doko A. A. EXPERIMENTAL STUDY OF THE WORK OF WOOD.....	55

Smirnych I. Y., Afanasyev A. P. PRACTICAL APPLICATION OF THE SOFTWARE COMPLEX RastrWin3 FOR SOLVING PROBLEMS IN NETWORKS OF 6 – 10 kV	61
Shlykov A. A., Afanasyev A. P. THE PROBLEM OF CHOOSING AN APPROPRIATE NEUTRAL GROUNDING MODE IN NETWORKS WITH VOLTAGES ABOVE 1 kV	67
PHYSICO-MATHEMATICAL SCIENCES.....	73
Afanasyev A. P., Sobovenko K. A. SIMULATION SIMULINK MODEL OF DIGITAL DIFFERENTIAL RELAY	73
Lapchina S. V., Shapovalov V. M. TRANSIENTS-VISCOUS FLUID IN A TUBE	79
Mazina A. G., Boychin R. E., Vasiliev A. S., Zemlyak V. L. APPLICATION OF REVIT STRUCTURE CAD SYSTEMS IN DESIGNING BUILDING SYSTEMS AND EXPORT OF DATA TO LIRA CADER RESTRICTOR	91
Seregin S. V. THE INFLUENCE OF INERTIAL AND STIFFNESS CHARACTERISTICS ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF THIN SHELLS.....	97
Taranukha N. A, Reznichenko A. Y., Vasiliev A. S. NUMERICAL INVESTIGATION OF THE STRESSED-DEFORMED CONDITION OF REINFORCED CONCRETE PLATES IN DIFFERENT METHODS OF STRENGTHENING	104
PROCEDURE FOR THE PUBLICATION OF ARTICLES IN THE JOURNAL.....	116

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 53.09; 620.197.1

А. П. Афанасьев, С. Ю. Борисова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ КРУПНЫХ ПТИЦ НА СТАТИСТИКУ АВАРИЙНЫХ ОТКЛЮЧЕНИЙ ВЛ-110 КВ

В статье представлены результаты статистического анализа аварийных отключений высоковольтных линий электропередач из-за воздействия, вызванного жизнедеятельностью крупных птиц. Проанализированы результаты лабораторного и имитационного экспериментов по влиянию органических загрязнений на проводящие свойства элементов ЛЭП высокого напряжения.

Ключевые слова: высоковольтные линии электропередач, анализ аварийных отключений, моделирование в MATLAB, SIMULINK, элемент Surgearresters, жизнедеятельность крупных птиц.

Введение

В настоящий момент исследование влияния жизнедеятельности крупных птиц на статистику аварийных отключений ВЛ-110 кВ является актуальным в сфере энергетики.

Птицы, используя на разных стадиях своей жизнедеятельности воздушные линии электропередач (ВЛ) и оборудование электрических подстанций (ПС), могут быть причиной повреждения и отключения ВЛ и оборудования ПС, что приводит к ущербу от перерыва электроснабжения потребителей, повреждению электрооборудования, а сами (птицы) подвергаются риску гибели. Особую опасность для работы воздушные линии электропередач и оборудования электрических подстанций представляет вероятность перекрытия межфазных промежутков и промежутков «фаза-земля» кусками металлической проволоки, электропроводки и другими материалами, приносимыми птицами, использующими элементы ВЛ и оборудования ПС в своей жизнедеятельности. Перекрытие изоляции под-

Афанасьев Александр Петрович — кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой технических дисциплин (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: mr.preceptor@yandex.ru.

Борисова Светлана Юрьевна — магистрант 1 курса (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: i01.04.1996@mail.ru.

© Афанасьев А. П., Борисова С. Ю., 2017

станционного оборудования может вызвать пожар на ПС и привести к системным авариям с большим экономическим ущербом [4].

Необходимость защиты птиц при их взаимодействии с воздушными линиями электропередач и оборудованием электрических подстанций определена рядом международных документов (конвенций, резолюций и деклараций) по охране биоразнообразия, а также федеральным законом № 52-ФЗ «О животном мире» от 24.04.1995 (ст. 28), постановлением Правительства РФ от 13.08.1996 № 997 (раздел VII пп. 33–34) и Положением ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе», Политикой инновационного развития, энергосбережения и повышения энергетической эффективности ПАО «Россети» [4].

В соответствии с п. 2.5.36 Правил устройства электроустановок, «в районах расселения крупных птиц для предохранения изоляции от загрязнения, независимо от степени загрязнения окружающей среды, а также для предотвращения гибели птиц следует на траверсах опор ВЛ 35-220 кВ, в том числе в местах крепления поддерживающих гирлянд изоляторов, а также на тросостойках для исключения возможности посадки или гнездования птиц, предусматривать установку противоптичьих заградителей» [2].

Гибель птиц в большинстве случаев обусловлена действием тока короткого замыкания. Если крылья птицы перекрывают промежуток между проводами, находящимися под напряжением различного значения, то электрический ток протекает через её тело, сильно сжигает и парализует его, что для птицы может быть фатальным. Нередки также случаи гибели, вызванные падением на землю. Это происходит, когда тело птицы само или гнездовой материал контактирует с находящимися под током частями линии. Близкое расположение и высокая влажность, возникающая из-за отходов жизнедеятельности (см. рис. 1), могут также увеличивать риск возникновения электрического искрения («электрической дуги»). Помимо этико-экологических проблем, возникают также проблемы технического характера, обусловленные пляской проводов, изменением проводящих свойств токопроводящих элементов ЛЭП и изоляторов. Всё это, в свою очередь, ведёт к нестабильной работе ВЛ.

Статистические данные и их анализ

По предоставленным материалам Дальневосточной Распределительной сетевой компании были проанализированы данные по аварийным отключениям ВЛ за период 2014–2017 гг. В результате анализа была определена доля аварийных отключений, возникших по причине жизнедеятельности крупных птиц. Результаты представлены в таблице 1.

Из таблицы видно, что птицы являются весомой причиной сбоев в электроснабжении, которые происходят вследствие прямого контакта с элементами ВЛ и оборудования ПС. Такие контакты являются первопричиной коротких замыканий с возможным выходом ВЛ из строя и повреждения оборудования ПС. Самых птиц этот контакт, как правило, приводит к смертельному исходу.



Рис. 1. Загрязнения биологическими отходами изоляторов

Таблица 1

Анализ всех отключений ВЛ-110 кВ

Год	Общее количество отключений	Отключения из-за воздействия птиц	
2014	68	15	22 %
2015	41	17	41,5 %
2016	23	2	8,7 %
2017	3	3	100 %

Как видно из таблицы, максимум отключений — 41 % — из-за воздействия птиц пришёлся на 2015 год.

Основное количество «птичьих» отключений ВЛ происходит весной, примерно в марте, и продолжается до поздней осени. Они происходят исключительно в период незадолго до и после восхода солнца («отключения на заре»). Это объясняется тем, что птицы начинают активную деятельность: гнездуются, выводят птенцов, питаются.

Предлагаемые методы противодействия аварийным ситуациям

В первую очередь, это создание птицевозащитных устройств антиприсадного типа, которые препятствуют посадке птиц на опоры ВЛ и их контакту с элементами ВЛ.

Данные устройства устанавливаются на траверсе ВЛ над местом крепления изоляторов и препятствуют посадке птицы на траверсу в зоне их защиты. Кроме того, они обладают отпугивающим эффектом за счёт колебаний элементов устройств, вызываемых воздействием ветра. Защищают изоляторы и провода от загрязнения птицами [4].

Практикуется также применение защитных футляров, которые защищают птиц от непосредственного контакта с арматурой ВЛ.

Устройства контактного типа (рис. 2) защищают птиц от непосредственного контакта с проводами ВЛ, а поверхность изоляторов и прилегающей части провода — от загрязнения птицами.



Рис. 2. Птицезащитные устройства контактного типа

Широкое распространение получили устройства отпугивающего типа, создающие визуальный и звуковой отпугивающий эффекты совместно с эффектом движения. Данные виды устройств должны изготавливаться преимущественно из изоляционных материалов, стойких к воздействию атмосферных факторов.

В качестве «гуманной» меры, которая охотно поддерживается экологическими объединениями и организациями, можно назвать мероприятия по созданию благоприятных условий для гнездования в не конфликтной зоне.

Рекомендуется в ряде случаев выполнять техническое дооснащение конструкций опор ЛЭП специальными гнездовыми платформами, предназначенными для расположения на них гнёзд определённых видов хищных и других видов птиц. Для защиты подвесных изоляторов ЛЭП желательно использовать полимерные защитные колпаки. Защитный колпак применяется для предохранения поверхности гирлянды изоляторов ВЛ от загрязнения помётом птиц, окрасочных работ, атмосферных осадков и механического воздействия [3].

Напряжение перекрытия снижается по мере увеличения проводимости слоя загрязнения, а она, при прочих равных условиях, зависит от концентрации проводящих растворимых примесей и объёма воды в слое загрязнения.

Удельная поверхностная проводимость увлажнённого слоя загрязнения в диапазоне температур от T_1 до T_2 может быть рассчитана по формуле (1):

$$\gamma_{тп}(T_2) = \gamma_{сп} [1 + \alpha_t(T_2 - T_1)] \frac{\rho_{сп}^{-1}(\gamma_B + \gamma_{сп} F_W)^2}{\rho_{сп}^{-1}(\gamma_B + \gamma_{сп} F_W) + \rho_{к}^{-1}\gamma_{к} + \rho_{сп}^{-1}\gamma_{сп}(1 - F_W)}, \quad (1)$$

где $\gamma_{сп}$ — удельная проводимость жидкой фазы при температуре T_1 , мкСм;

α_t — температурный коэффициент электропроводности электролита, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

$\rho_{\text{эф}}$ — плотность раствора электролита, $\text{мг}/\text{см}^3$;

$\gamma_{\text{эч}}$ — масса всех частиц электролита на единицу поверхности, $\text{мг}/\text{см}^2$;

$\gamma_{\text{в}}$ — масса воды на единицу поверхности, $\text{мг}/\text{см}^2$;

$\gamma_{\text{н}}$ — масса нерастворимых диэлектрических частиц, $\text{мг}/\text{см}^2$;

$F_{\text{в}} = \frac{\gamma_{\text{эф}}}{\gamma_{\text{эч}}}$, где $\gamma_{\text{эф}}$ — масса растворившихся частиц электролита на единицу поверхности, $\text{мг}/\text{см}^2$;

$\rho_{\text{н}}, \rho_{\text{эф}}$ — плотность соответственно нерастворимых диэлектрических частиц и не растворившихся частиц электролита, $\text{мг}/\text{см}^3$;

Лабораторный имитационный эксперимент

Для установления условий, способствующих снижению изоляционных свойств в результате воздействия органических загрязнений, в лаборатории ДРСК были проведены испытания изолятора, подверженного органическому загрязнению. Цель испытаний: получение следующих параметров, которые присутствуют в аналитическом выражении согласно формуле (1).

По полученным в результате лабораторного анализа данным был поставлен имитационный эксперимент.

В дальнейшем в пакете SIMULINK была создана имитационная модель ЛЭП, блок-схема которой представлена на рисунке 3, где в качестве загрязнённых изоляторов служил элемент Surge arrester, имеющий нелинейную вольт-амперную характеристику, которую можно настроить в соответствии с данными лабораторного анализа.

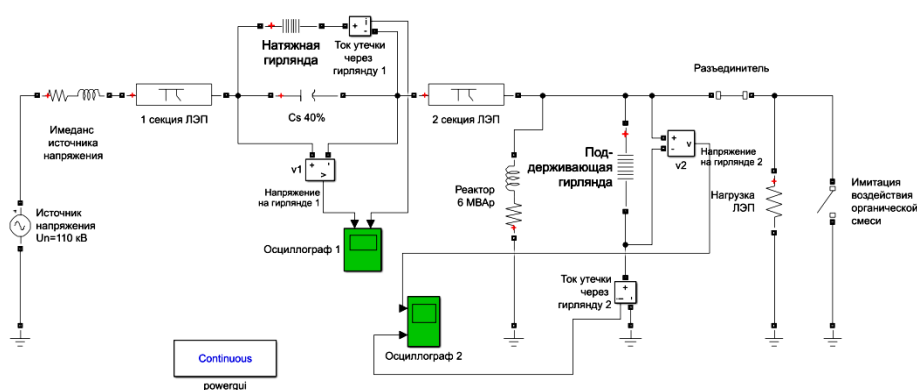


Рис. 3. Имитационная модель ЛЭП

В ходе исследования была промоделирована аварийная ситуация, вызванная влиянием органической примеси на проводимость гирлянд изоляторов (рис. 4, 5).

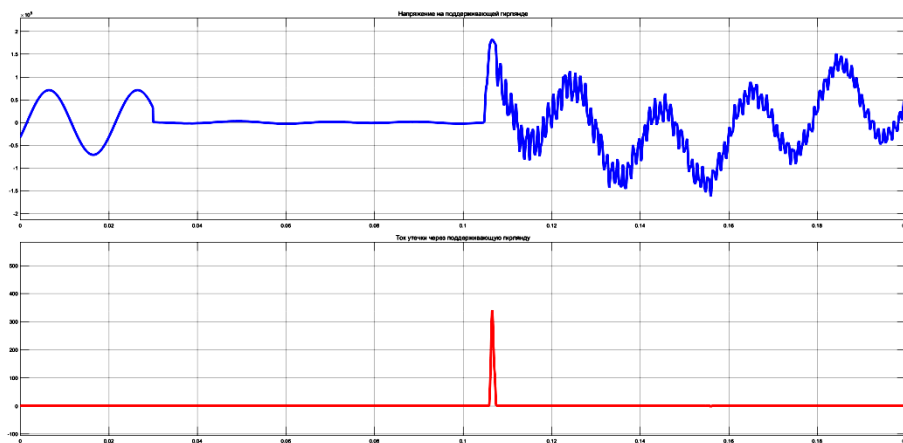


Рис. 4. Напряжение и ток утечки через поддерживающую гирлянду

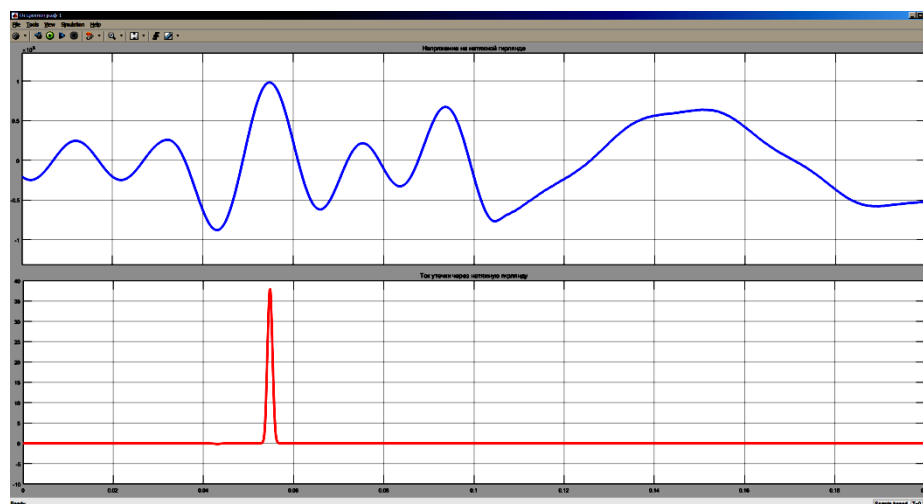


Рис. 5. Напряжение и ток утечки на натяжной гирлянде

Из осциллограмм видно, что на натяжной гирлянде в момент возникновения короткого замыкания напряжение падает до нуля, что свидетельствует о резком увеличении проводимости этого элемента. По мере высыхания и испарения загрязняющей смеси происходят хаотические отклонения напряжения от основной синусоидальной гармоник. В дальнейшем график напряжения стабилизируется. Ток на гирлянде выглядит в виде однократного пикового скачка. Максимальное напряжение на поддерживающих гирляндах достигает 180 кВ, а максимальный ток в момент стекания по изолятору достигает более 350 А (рис. 4).

На натяжной гирлянде форма напряжения также претерпевает отклонения от синусоидальной, но не наблюдаются хаотические всплески, величина действующего напряжения в момент воздействия загрязнения равна 110 кВ, а ток утечки сравнительно небольшой — порядка 40 А (рис. 5).

Данное различие в графиках объясняется тем, что для изменения изолирующих свойств натяжной гирлянды требуется большее количество загрязняющей органической смеси, так как она не растекается по поверхности изолятора в отличие от поддерживающей гирлянды.

На поддерживающей гирлянде загрязнение распределяется по поверхности за счёт силы тяжести.

Выводы:

- 1) в качестве наиболее вероятной причины отключений, происходящих в весенне-летний и осенний периоды в утренние и ночные часы, можно полагать перекрытие изоляции, вызванное действиями птиц;
- 2) данные лабораторных экспериментов подтверждают влияние органических примесей на проводящие свойства элементов ЛЭП;
- 3) описанный в работе имитационный эксперимент позволяет проследить механизм возникновения аварий, вызванных жизнедеятельностью крупных птиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин В. Н. Системы электроснабжения. Конструкции и механический расчёт: учебное пособие. СПб.: СЗТУ, 2002. 93 с.
2. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. [электронный ресурс]. URL: <http://pue7.ru/pue7/punkt.php?n=2.5.25&k=2.5.37>
3. Птицезащитные устройства: рекомендации по обеспечению безопасности птиц при эксплуатации воздушных линий электропередачи //Российская сеть изучения и охраны пернатых хищников [электронный ресурс]. URL: <http://rrrcn.ru/ru/electrocutions/bpd>
4. СТО 34.01-2.2-010-2015. Птицезащитные устройства для воздушных линий электропередачи и открытых распределительных устройств подстанций. Введ. 18.08.2015. М.: ПАО «Россети», 2015. 14 с.

* * *

Afanasev Aleksandr P., Borisova Svetlana JU.
A STUDY OF THE INFLUENCE OF LIFE OF LARGE BIRDS
ON THE STATISTICS OF OUTAGES VL-110 KV
 (Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan)

The article presents the results of a statistical analysis of emergency outages of high-voltage power transmission lines due to the impacts of large birds caused by vital activity. The results of laboratory and simulation experiments on the effect of organic contaminants on the conductive properties of high voltage transmission line elements are analyzed.

Keywords: high voltage transmission lines, the analysis of outages, the modeling in MATLAB, SIMULINK, element Surge arresters, the livelihoods of large birds.

REFERENCES

1. Kostin V. N. *Sistemy elektrosnabzheniia. Konstrukcii i mekhanicheskii raschet* (The power supply system. Design and mechanical calculation), a Training manual, St. Petersburg, 2002. 93 p.
2. *Pravila ustroistva elektroustanovok*, Rules for the installation of electrical installations, 7th Edition. Available at: <http://pue7.ru/pue7/punkt.php?n=2.5.25&k=2.5.37> (In Russ.).
3. *Ptitczashchitnye ustroistva: rekomendacii po obespecheniiu bezopasnosti ptits pri ekspluatatsii vozdushnykh linii elektroperedachi* (Poultry protection devices: recommendations for ensuring the safety of birds in the operation of overhead transmission lines), Available at: <http://rrcn.ru/ru/electrocutions/bpd> (In Russ.).
4. *STO 34.01-2.2-010-2015. Ptitczashchitnye ustroistva dlia vozdushnykh linii elektroperedachi i otkrytykh raspredelitelnykh ustroistv podstantsii* (STO 34.01-2.2-010-2015. Protective devices from birds for overhead power lines and open switchgear of substations), from 08/18/2015. Moscow: Rosseti Publ., 2015. 14 p. (In Russ.).

* * *

УДК 621.313

А. Ф. Бирюков, А. П. Афанасьев**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ТРЁХФАЗНЫМ
АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ СКОЛЬЖЕНИЯ**

В данной работе предложен метод повышения эффективности работы асинхронного привода при низких частотах и небольших величинах нагрузок с помощью компенсации скольжения. Предложенный метод проанализирован с помощью SIMULINK-модели системы управления электроприводом. Данная модель позволила определить оптимизационную поправку к питающему напряжению.

Ключевые слова: горно-обогатительное оборудование, управляемый асинхронный электропривод, энергоэффективная оптимизация, компенсация скольжения, имитационное моделирование электропривода.

Введение

Горно-обогатительное оборудование является наиболее энергоёмким, его работа должна гарантировать строгое соблюдение технологического режима. Двигатели, с помощью которых осуществляется производственный процесс в горно-обогатительной отрасли, как правило, работают с резко-переменными нагрузками. В связи с этим роль эффективного управления данными системами электропривода имеет немало важное значение с точки зрения энергоэффективности.

Электропривод горно-обогатительного оборудования на 90 % состоит из асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

При низких нагрузках коэффициент полезного действия данных двигателей имеет тенденцию к резкому убыванию по причине возрастающих потерь в обмотке и сердечнике статора.

Существует несколько способов управления скоростью асинхронного двигателя. Наиболее распространённые из них приведены на диаграмме, представленной на рисунке 1.

Бирюков Алексей Фёдорович — магистрант 2 курса (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан).

Афанасьев Александр Петрович — кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой технических дисциплин (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: mr.preceptor@yandex.ru.

© Бирюков А. Ф., Афанасьев А. П., 2017



Рис. 1. Способы регулирования скорости асинхронного двигателя

Как видно из представленной диаграммы, одним из вариантов является изменение величины питающего напряжения. Но изменять только напряжение недостаточно, так как электромагнитный момент, развиваемый двигателем, зависит от квадрата напряжения согласно выражению (1):

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2\omega_s} \left(\frac{3V_{TH}^2}{R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \right). \quad (1)$$

Для того, чтобы величина электромагнитного момента находилась в желаемых пределах, необходимо менять величину ω_s по закону, приведённому в выражении (2):

$$V_1 = \frac{f_1}{f_n} V_n, \quad (2)$$

здесь V_n и f_n — номинальные напряжение и частота, соответственно.

Графически это соотношение представлено на рисунке 2.

Данное соотношение является определяющим при скалярном способе управления скоростью двигателя.

Недавние исследования [2, 3] показали, что постоянство отношения напряжения статора к частоте не соответствует оптимальным параметрам энергопотребления асинхронного двигателя.

С помощью экспериментальных исследований было показано, что вблизи малых значений нагрузочного момента и частоты зависимость соотношения между напряжением и частотой для максимальных значений коэффициента полезного действия принимает более сложный нелинейный характер.

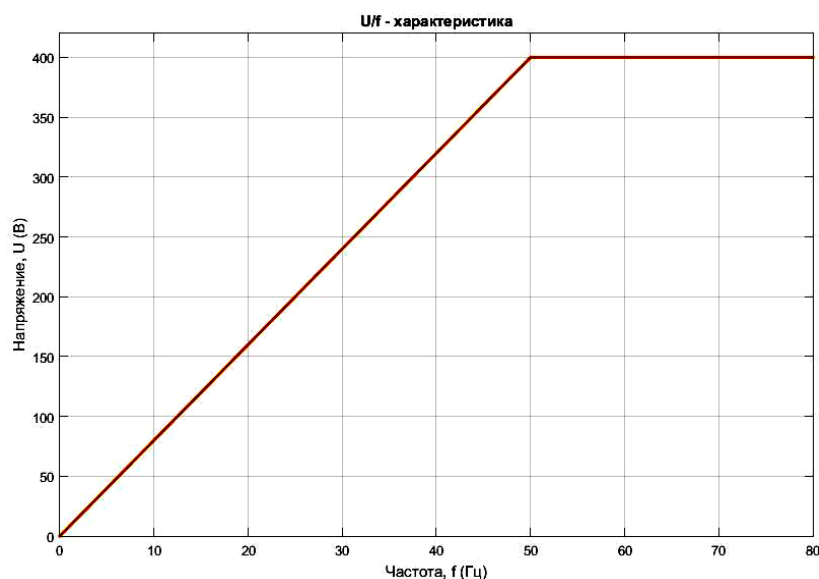


Рис. 2. Взаимосвязь напряжения и частоты при скалярном регулировании скорости привода

В работе [1] авторы, опираясь на предположение о том, что наиболее эффективным значением скольжения является критическое значение, предлагают скалярную систему управления АД с обратными связями, которая по своим характеристикам сравнима с классической векторной системой и, соответственно, частично компенсирует недостатки, связанные с уменьшением коэффициента полезного действия в области малых частот, питающего напряжения и малых значений нагрузок.

Для того, чтобы во всём диапазоне изменения частоты вращения двигателя и нагрузочного момента КПД был максимально возможным, необходимо, чтобы скольжение двигателя было оптимальным для заданных значений напряжения и частоты.

Управление (компенсация) скольжением возможно соответствующим выбором добавки напряжения к заданному напряжению на зажимах статора. Таким образом, цель настоящего исследования — выбор напряжения, соответствующего максимальному коэффициенту полезного действия двигателя в широких пределах изменения момента нагрузки и частоты вращения.

Блок управления скольжением

Для компенсации скольжения относительно оптимального значения было предложено использовать интегральный регулятор (3), который позволяет получить значение добавочного напряжения не только для текущего отклонения скольжения, но и учитывать всю «историю» ошибок.

$$V_{доб} = K_i \int (s_n - s) dt \quad (3)$$

Как видно из приведённого выше соотношения, необходимо подобрать K_i , который бы соответствовал максимальному КПД.

Для реализации блока управления скольжением была создана SIMULINK модель, в которой был воплощён предложенный выше подход.

На рисунке 3 представлена модель блока управления, которая является частью общей имитационной модели работы асинхронного двигателя в различных тестовых режимах.

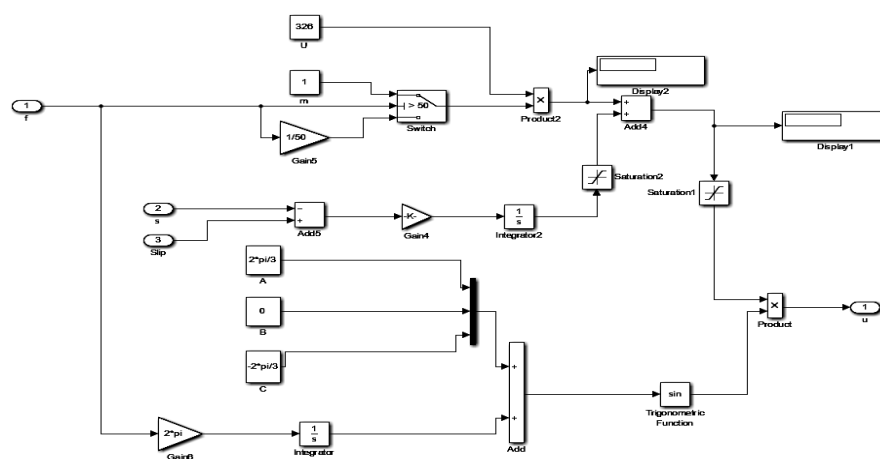


Рис. 3. Схема контроллера блока оптимизации скольжения

На рисунке 4 представлена общая модель асинхронного электропривода с блоком оптимизации скольжения.

На представленном изображении блок оптимизации скольжения находится в подсистеме «S-controller».

На вход блока «S-controller» подаётся заданное значение частоты питающего напряжения — f , требуемое значение скольжения — s , обусловленное конструкцией двигателя и действительное значение скольжения — Slip, полученное с датчиков измерительных блоков электропривода.

На выходе значения питающего напряжения ротора с учётом компенсирующего скольжение добавочного напряжения.

Результаты моделирования и их анализ

Результаты имитационного эксперимента показывают, что вблизи малых значений частот напряжения питания двигателя и низких нагрузочных моментов, а также при частоте, близкой к промышленной (50 Гц), коэффициент полезного действия двигателя с блоком компенсации скольжения имеет более высокие значения, что подтверждает эффективность предложенного алгоритма.

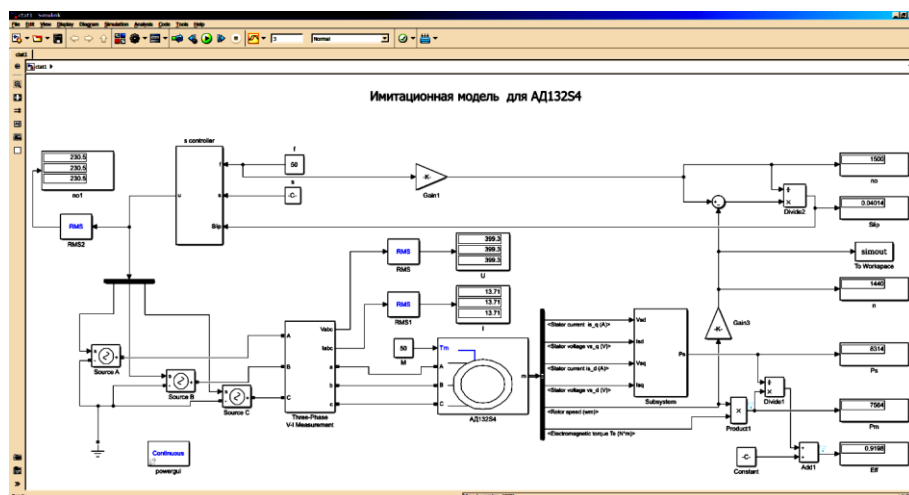


Рис. 4. Имитационная модель асинхронного электропривода с блоком оптимизации скольжения

В остальных диапазонах работы двигателя наблюдаются примерно равные значения КПД для обеих схем.

Рисунок 5 иллюстрирует работу интегрального регулятора блока оптимизации скольжения при частоте питающего напряжения 5 Гц и нагрузочном моменте 15 Н*м.

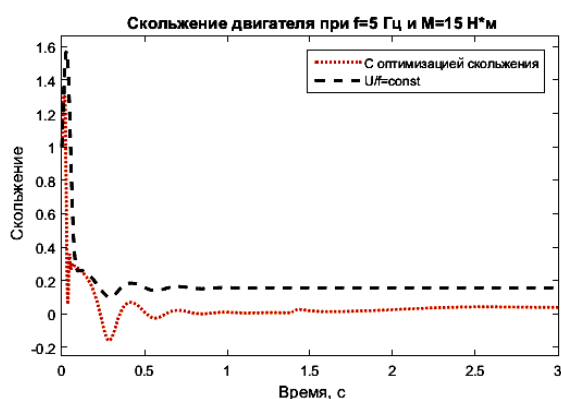


Рис. 5. Значения скольжений асинхронного двигателя с учётом и без учёта оптимизации при заданных условиях

Как видно из рисунка, на начальном этапе имитации значения скольжения в моделях с оптимизацией и без оптимизации не определено и подвержено резким скачкам.

В дальнейшем, по мере накопления интегралом «истории отклонений» скольжения, оптимизированное значение скольжения имеет более

низкий уровень, что свидетельствует об уменьшении магнитного потока поля статора и, следовательно, меньшего энергопотребления.

Вывод

Предложенный в настоящей работе подход, основанный на идее компенсации скольжения, позволяет повысить коэффициент полезного действия асинхронного электропривода при низких частотах питающего напряжения и малых нагрузочных моментах от 25 до 40 % по сравнению с «классическим» скалярным способом управления.

Учёт оптимизации скольжения позволяет работать приводу с более энергоэффективными показателями вследствие уменьшения энергетических потерь в узлах асинхронного двигателя.

Данный метод управления отличается простотой осуществления и надёжностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов А. П., Чуркин Б. А. Скалярное управление асинхронным короткозамкнутым двигателем по активной составляющей тока статора // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2014. Т. 14. № 3. С. 85 – 90.
2. Leonhard W. Controlled AC Drives, a Successful Transfer from Ideas to Industrial Practice // Control Engineering Practice. Vol. 4. № 7. 1996. P. 897 – 908.
3. Li J., Xu L., Zhang Z. A new efficiency optimization method on vector control of induction motor // Proc. IEEE Conf. Electrical Machines and Drives. 2005. P. 1995 – 2001.

* * *

Birykov Alexey F., Afanasyev Alexander P.
ENERGY-EFFICIENT CONTROL OF FREQUENCY-REGULATED THREE-PHASE
ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF MINING EQUIPMENT BY THE METHOD
OF SLIP COMPENSATION

(Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan)

In this paper, we propose a method for increasing the efficiency of an asynchronous drive at low frequencies and small loads with the help of slip compensation. The proposed method is analyzed using the simulink model of the electric drive control system. This model allowed to determine the optimization correction to the supply voltage.

Keywords: mining equipment, controlled asynchronous electric drive, energy-efficient optimization, slip compensation, simulation of the electric drive.

REFERENCES

1. Emelianov A. P., Churkin B. A. Scalar control of squirrel-cage induction motor with stator active current, *Bulletin of the South Ural State University, Series "Power Engineering"*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 85 – 90.
2. Leonhard W. Controlled AC Drives, a Successful Transfer from Ideas to Industrial Practice, *Control Engineering Practice*, vol. 4, no. 7, 1996, pp. 897 – 908.
3. Li J., Xu L. and Zhang Z. A new efficiency optimization method on vector control of induction motor, *Proc. IEEE Conf. Electrical Machines and Drives*, 2005, pp. 1995 – 2001.

* * *

УДК 531.001.362

В. Л. Земляк, В. М. Козин, Н. О. Баурин,**С. В. Радионов, И. А. Коновалов**

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ ДВИЖЕНИЯ ПОГРУЖЁННОГО ТЕЛА

Экспериментально исследовано движение с последующим торможением погружённого тела под ледяным покровом. Исследование проводилось в опытовом ледовом бассейне лаборатории ледотехники Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема, г. Биробиджан. Максимальные значения прогибов модельного льда наблюдались для стационарного движения погружённого тела с критическими скоростями. Режимы замедления приводили к значительному уменьшению прогибов льда.

Ключевые слова: погружённое тело, лёд, изгибно-гравитационные волны, нестационарное движение.

Введение

На сегодняшний день опубликовано много работ, посвящённых теоретическим исследованиям воздействия движущейся нагрузки на ледяной покров. Хейсиным Д. Е. [8] рассмотрена задача стационарного движения одиночного вихря под слоем битого льда. Букатов А. Е. и Жарков В. В. [1] исследовали стационарное движение одиночного источника массы под плавающей упругой пластиной. В работе Стуровой И. В. [7] рассматривается влияние вынужденных малых колебаний погружённых тел на их присоединённую массу и коэффициенты зату-

Земляк Виталий Леонидович — кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе и инновациям (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: vellkom@list.ru.

Козин Виктор Михайлович — доктор технических наук, профессор (Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре); e-mail: vellkom@list.ru.

Баурин Никита Олегович — аспирант (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: vellkom@list.ru.

Радионов Сергей Владимирович — студент (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: vellkom@list.ru.

Коновалов Иван Анатольевич — студент (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: vellkom@list.ru.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10097).

© Земляк В. Л., Козин В. М., Баурин Н. О., Радионов С. В., Коновалов И. А., 2017

хания. Шишмарев К. А., Хабахпашева Т. И., Коробкин А. А. [9] рассмотрели движение диполя с постоянной скоростью в канале под ледяным покровом. В работе Погореловой А. В. [5] выполнено исследование нестационарных режимов движения тела по плавающему ледяному покрову. Установлено, что если тело начинает двигаться с ускорением и достаточно быстро переходит на сверхкритическую скорость, тогда критических значений волнового сопротивления можно избежать. Нестационарное движение одиночного источника под плавающей упругой пластиной было исследовано в работе Погореловой А. В. [4]. В работе [6] при теоретическом исследовании нестационарного движения тонкого тела предполагалось, что в начальный момент судно покоится, затем после быстрого ускорения выходит на равномерное движение. Экспериментальные работы, посвящённые исследованию нестационарного движения погружённого тела вблизи нижней поверхности ледяного покрова, не встречаются.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния торможения погружённого тела на прогибы плавающего ледяного покрова.

1. Подготовка к проведению экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования движения моделей ПС под поверхностью ледяного покрова проводились в опытовом ледовом бассейне лаборатории ледотехники. Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема (Россия, г. Биробиджан) [2].



Рис. 1. Общий вид ледового бассейна с неразрушаемой моделью льда

Габариты бассейна составляют: длина 10 м; ширина 3 м; уровень воды в чаше бассейна не менее 0,95 м (рис. 1). Эксперименты проводились при относительных скоростях перемещения нагрузки, равных $Fr = 0,44 - 0,65$, и глубине погружения модели, равной $h_0 = 0,066$ м. Буксировки модели выполнялись под ледяным покровом, в качестве которого использовалась упругая плёнка толщиной 3 мм с известным значением модуля Юнга, обеспечивающим проведение экспериментов в масштабе 1:300.

В качестве модели погружённого тела использовался эллипсоид вращения с относительным удлинением L_m/B_m (где L_m — длина модели), равным 8,4. Водоизмещение модели после пересчёта на натуру составило порядка 24000 т.

Моделирование производилось по критериям подобия Фруда и Коши, в соответствии с известной методикой моделирования изгибно-гравитационных волн (ИГВ) в сплошном неразрушаемом льду [3]:

$$E_n/E_m = h_n/h_m = \lambda_l,$$

где E_n — модуль упругости натурального льда, E_m — модуль упругости модельного льда, h_n — толщина натурального льда, h_m — толщина модельного льда, λ_l — геометрический масштаб.

Модель судна была геометрически подобна натурному судну, поэтому выполнялись условия:

$$L_n/L_m = \lambda_l, \quad D_n/D_m = \lambda_l^3,$$

где L_n — длина модели ПС; L_m — длина натурального ПС; D_n — водоизмещение модели ПС; D_m — водоизмещение натурального ПС.

Скорость движения модели определялась из условия:

$$v_n/v_m = \lambda_l^{1/2},$$

где v_n — скорость движения модели ПС; v_m — скорость движения натурального ПС.

Прогибы модельных ИГВ ω_n пересчитывались на натуру согласно соотношениям:

$$\omega_n/\omega_m = \lambda_l,$$

где ω_n — прогиб натуральных.

Для проведения экспериментов была спроектирована и изготовлена необходимая оснастка и сформирован измерительный комплекс для регистрации колебаний модельного поля льда. В процессе буксировки модели определялась скорость её движения и записывались профили взволнованной поверхности льда. Для записи колебаний модельного

льда использовались бесконтактные лазерные датчики LAS-Z компании Way Con (Германия). Профили ИГВ записывались с помощью программы Test.viewer 2,34. Изменение скорости буксировки моделей субмарин осуществлялось сервоприводом СПШ20 Сервотехника (Россия).

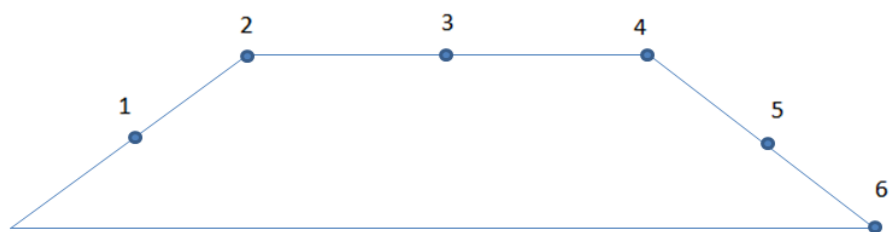


Рис. 2. Режим движения модели погружённого тела

В экспериментальных исследованиях режим движения модели погружённого тела задавался графиком (рис. 2). Режим разгона и торможения был равноускоренный и равнозамедленный до полной остановки модели в точке 6.

Измерение прогибов пластины осуществлялось в точках 2, 3, 5 и 6, значения расстояний от начала движения до точек 1, 2, 3, 4, 5 и 6 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Измерение прогибов пластины в точках

Скорость модели V_r	Расстояние от начала движения до точки 1, м	Расстояние от начала движения до точки 2, м	Расстояние от начала движения до точки 3, м	Расстояние от начала движения до точки 4, м	Расстояние от начала движения до точки 5, м	Расстояние от начала движения до точки 6, м
0,45	0,645	1,29	2,990	4,69	5,355	6,02
0,50	0,770	1,54	3,130	4,72	5,530	6,34
0,55	0,965	1,93	3,355	4,78	5,780	6,78
0,60	1,125	2,25	3,500	4,75	5,940	7,13
0,65	0,885	1,77	2,845	3,92	5,380	6,84

2. Результаты модельных экспериментов

Прогибы ледяного покрова определялись из профилей ИГВ, записанных датчиком вертикальных перемещений (рис. 3–6).

На рисунке 7 представлены результаты измерений прогибов ледяного покрова при различных скоростях движения в точках измерений 2, 3, 5 и 6, т. е. для случая, когда модель только вышла на равномерное движение (точка 2), стационарный режим движения (точка 3), на этапе торможения, когда была пройдена половина пути тормозного участка (точка 5) и в момент полной остановки (точка 6).

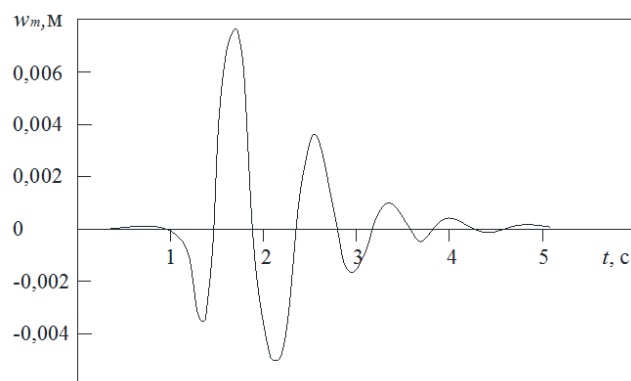


Рис. 3. Профиль ИГВ в точке 2 для скорости перемещения нагрузки, равной $Fr = 0,65$

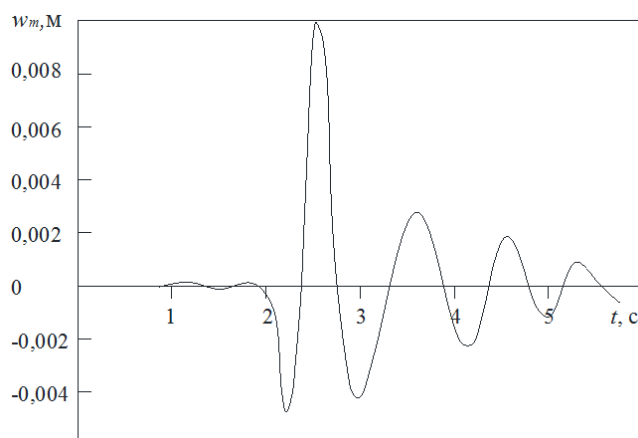


Рис. 4. Профиль ИГВ в точке 3 для скорости перемещения нагрузки, равной $Fr = 0,65$

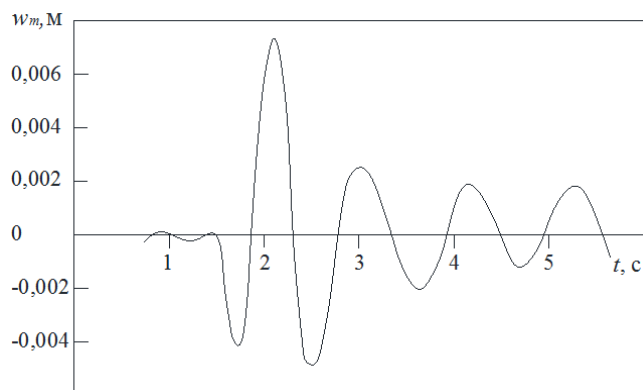


Рис. 5. Профиль ИГВ в точке 5 для скорости перемещения нагрузки, равной $Fr = 0,65$

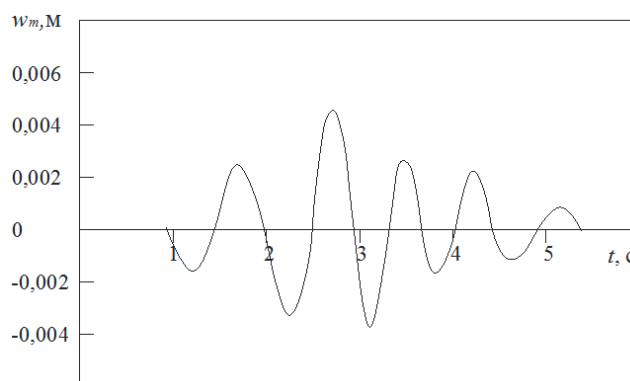


Рис. 6. Профиль ИГВ в точке 5 для скорости перемещения нагрузки, равной $Fr = 0,65$

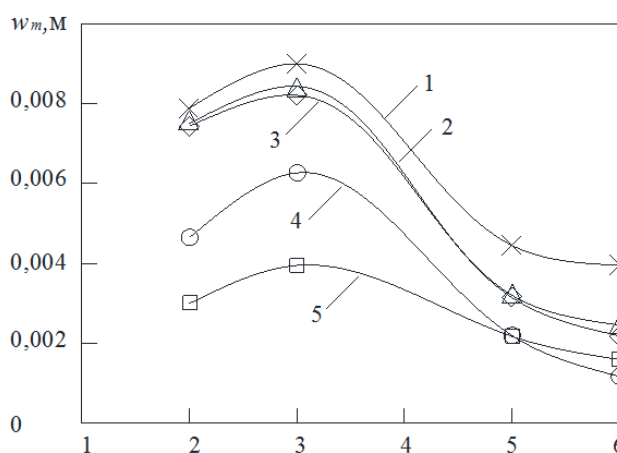


Рис. 7. Зависимость максимальных прогибов ИГВ в различных точках движения нагрузки при различных скоростях движения

Результаты показывают, что максимальные значения прогибов наблюдались при выходе нагрузки на стационарный режим движения. Режим торможения приводит к резкому уменьшению значения прогибов. Минимальные значения прогибов наблюдались в точке полной остановки модели нагрузки.

Отметим, что максимальные значения ω_m были получены при критической скорости движения, которая составила $Fr = 0,6$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букатов А. Е., Жарков В. В. Влияние плавающей пластины на поверхностные проявления внутренних волн при движении источника в неоднородной жидкости // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1995. № 2. С. 118–125.

2. Земляк В. Л., Баурин Н. О., Курбацкий Д. А. Лаборатория «Ледотехники» // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. № 1(12). С. 68–77.
3. Козин В. М. Обоснование исходных данных для выбора основных параметров СВП, предназначенных для разрушения ледяного покрова резонансным способом: дисс. ... канд. техн. наук. Горький: ГПИ им. А. А. Жданова, 1983. 314 с.
4. Погорелова А. В. Нестационарное движение источника в жидкости под плавающей пластиной // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 5. С. 49–59.
5. Погорелова А. В. Особенности волнового сопротивления СВПА при нестационарном движении по ледяному покрову // Прикладная механика и техническая физика. 2008. Т. 49. № 1. С. 89–99.
6. Погорелова А. В., Козин В. М., Земляк В. Л. Движение тонкого тела в жидкости под плавающей пластиной // Прикладная механика и техническая физика. 2012. Т. 53. № 1. С. 32–44.
7. Стурова И. В. Движение погружённой сферы в жидкости под ледяным покровом // Прикладная математика и механика. 2012. Т. 76. № 3. С. 406–417.
8. Хейсин Д. Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 216 с.
9. Shishmarev K. A., Khabakhpasheva T. I., Korobkin A. A. Deflection of ice cover caused by an underwater body moving in channel // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 894. No. 1. 012109. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012109. URL: <http://china.iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/894/1/012109>.

* * *

**Zemliak Vitaly L., Kozin Victor M., Baurin Nikita O.,
Radionov Sergey V., Kononov Ivan A.**
**THE RESEARCH ON DEFORMED STATE OF ICE COVER WITH
NON-STATIONARY MOTION MODE OF A SUBMERGED BODY**
(Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan)

The experimentally studied motion with the subsequent braking of the submerged body under the ice cover. The study was conducted in the experimental ice tank of the laboratory «Ice technology» at the Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan. The maximum values of deflections of model ice were observed for the stationary motion of an immersed body with critical velocities. Modes of deceleration led to a significant decrease in the deflections of ice.

Keywords: submerged body, ice, flexural-gravity waves, non-stationary motion.

REFERENCES

1. Bukatov A. E., Zharkov V. V. Effect of a Floating Plate on the Surface Manifestations of Internal Waves during Motion of the Source in an Inhomogeneous Fluid [Vliyanie plavayushchey plastiny na poverkhnostnye proyavleniya vnutrennikh voln pri dvizhenii istochnika v neodnorodnoy zhidkosti], *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 1995, no. 2, pp. 118–125.
2. Zemlyak V. L., Baurin N. O. and Kurbackiy D. A. Laboratory «Ice technology» [Laboratoriya «Ledotekhniki»], *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleykhema*, 2013, no. 1(12). pp. 68–77.
3. Kozin V. M. *Obosnovanie iskhodnykh dannykh dlya vybora osnovnykh parametrov SVP, prednaznachennykh dlya razrusheniya ledyanogo pokrova rezonansnym sposobom* (Substantiation of Initial Data for Choosing Basic Parameters for Hovercraft Designed for

- Breaking Ice Cover by Resonant Method), Thesis for Candidate of Technical Sciences, Gor'kii, GPI im. A. A. Zhdanova, 1983, 314 p.
4. Pogorelova A. V. Unsteady Motion of a Source in a Fluid Under a Floating Plate, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2011, vol. 52, no. 5, pp. 717–726.
 5. Pogorelova A. V. Wave resistance of an air-cushion vehicle in unsteady motion over an ice sheet, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2008, vol. 49, no. 1, pp. 71–79.
 6. Pogorelova A. V., Kozin V. M., Zemlyak V. L. Motion of a Slender Body in a Fluid Under a Floating Plate, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2012, vol. 53, no. 1, pp. 27–37.
 7. Sturova I. V. The Motion of a Submerged Sphere in a Liquid Under an Ice, *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2012, vol. 76, no. 3, pp. 293–301.
 8. Kheysin D. E. *Dinamika ledyanogo pokrova* (Ice-Field Dynamics), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1967. 216 p.
 9. Shishmarev K. A., Khabakhpasheva T. I., Korobkin A. A. Deflection of ice cover caused by an underwater body moving in channel, *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 894, no. 1, 012109. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012109.

* * *

УДК 531.001.362

**В. Л. Земляк, В. М. Козин, Е. Г. Рогожникова,
С. В. Радионов, И. А. Коновалов**

ВЛИЯНИЕ ТРЕЩИН И РАЗВОДИЙ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВОЗБУЖДАЕМЫХ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ОТ ДВИЖЕНИЯ ПОГРУЖЁННОГО ТЕЛА

Ранее авторами экспериментально установлено, что эффективность и характер разрушения ледяного покрова изгибно-гравитационными волнами, генерируемыми от движения погружённого тела, вблизи нижней поверхности льда может существенно зависеть от наличия во льду свободной кромки. В свою очередь, влияние на параметры ИГВ также оказывают и характеристики погружённого тела (длина, ширина, наличие цилиндрической вставки). В работе были определены зависимости параметров изгибно-гравитационных волн от рассматриваемых характеристик моделей и ледовых условий (наличия раскрытой трещины и развоидов различной ширины). Определён характер разрушения ледяного покрова. Выявлены режимы движения, при которых разрушение льда было наиболее интенсивным.

Ключевые слова: подводное судно, лёд, изгибно-гравитационные волны, раскрытая трещина, разводья.

Введение

На сегодняшний день экипажами российских и иностранных субмарин совершено большое количество арктических походов с длительными переходами подо льдом. Подобные плавания атомных подводных лодок (АПЛ) стали распространённым событием. В будущем следует прогнозировать дальнейшее освоение Арктики подводными судами (ПС), что так-

Земляк Виталий Леонидович — кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе и инновациям (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: vellkom@list.ru.

Козин Виктор Михайлович — доктор технических наук, профессор (Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре); e-mail: vellkom@list.ru.

Рогожникова Елена Григорьевна — старший преподаватель кафедры информационной безопасности, информационных систем и физики (Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет, Комсомольск-на-Амуре); e-mail: Steinbockh@mail.ru.

Радионов Сергей Владимирович — студент (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: vellkom@list.ru.

Коновалов Иван Анатольевич — студент (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: vellkom@list.ru.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10097).

© Земляк В. Л., Козин В. М., Рогожникова Е. Г., Радионов С. В., Коновалов И. А., 2017

же может быть связано с обнаружением на шельфе многочисленных крупных месторождений углеводородов. Особое внимание при этом вызывают вопросы добычи и транспортировки полезных ископаемых. С учётом суровых климатических условий и короткого сезона открытой воды возникает необходимость создания специальных транспортных средств, способных беспрепятственно преодолевать ледяные поля толщиной более 2 метров. Решение данного вопроса требует новых подходов к способам добычи и транспортировки сырья, которые можно реализовать с помощью подводных судов.

Анализ арктической ледовой обстановки показывает, что ледяной покров сохраняется практически в течение всего года на большей части региона. Основным фактором, характеризующим эффективность эксплуатации подводных судов в акватории Северного Ледовитого океана, является возможность осуществления их всплытия в различных ледовых условиях. На сегодняшний день всплытие подводного судна возможно:

- в сплошном ледяном покрове толщиной до 2 метров традиционным методом путём статического нагружения льда снизу (рис. 1);



Рис. 1. Всплытие американской АПЛ USS Annapolis (SSN 760) в сплошном льду во время учений ICEX 2009

- в естественных и искусственно образованных полыньях или зонах мелкобитого льда;

- в каналах и разводьях, образующихся в сплошном ледяном покрове под воздействием динамических факторов и приливно-отливных явлений (рис. 2) [1].

Опыт подлёдного плавания в Арктике показывает, что вероятность обнаружения благоприятной ледовой обстановки значительно зависит от района, периода времени и других факторов.

Для разрушения ледяного покрова можно использовать гидродинамические нагрузки, возникающие от движения ПС вблизи его нижней поверхности.



Рис. 2. Всплытие американской АПЛ USS New Mexico (SSN-779) в разводье, Арктика, 2014 г.

Д. Е. Хейсиным [2] теоретически рассмотрена задача движения вихря под сплошным ледяным покровом. В работе [3] экспериментально показана возможность разрушения естественного льда изгибно-гравитационными волнами (ИГВ) от движения модели ПС. Ранее авторами установлено, что на параметры ИГВ существенное влияние оказывают ледовые условия, в которых перемещается ПС [4], а также форма судна и его характеристики [5].

В работе выполнено экспериментальное исследование влияния основных характеристик погружённого тела на параметры ИГВ, генерируемых в ледяном покрове при наличии в нём свободной кромки (продольной раскрытой трещины, разводий различной ширины).

1. Подготовка к проведению экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования движения моделей ПС под поверхностью ледяного покрова проводились в опытовом ледовом бассейне лаборатории ледотехники Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема (Россия, г. Биробиджан) [6].

Габариты бассейна составляют: длина 10 м; ширина 3 м; уровень воды в чаше бассейна не менее 0,95 м (рис. 3). Масштаб моделирования $\lambda_l = 1 : 120$ выбирался исходя из размеров ледового бассейна, при этом длина бассейна обеспечивала выход на стационарный режим движения моделей судов. Ширина была достаточной для исключения влияния отражённых от боковых стенок канала волн на основную волновую систему [7].

Для проведения экспериментов было использовано три модели ПС с различным относительным удлинением и водоизмещением (рис. 4). Модели имели следующие характеристики: модель № 1 — относительную длину $L_m/B_m = 13,3$ (где L_m — длина модели, B_m — ширина модели) и соответствовала судну с полным подводным водоизмещением после пересчёта на натуру $D_n = 18000$ т; модель № 2 — $L_m/B_m = 8,4$, $D_n = 24000$ т; модель № 3 — $L_m/B_m = 8$, $D_n = 12000$ т.

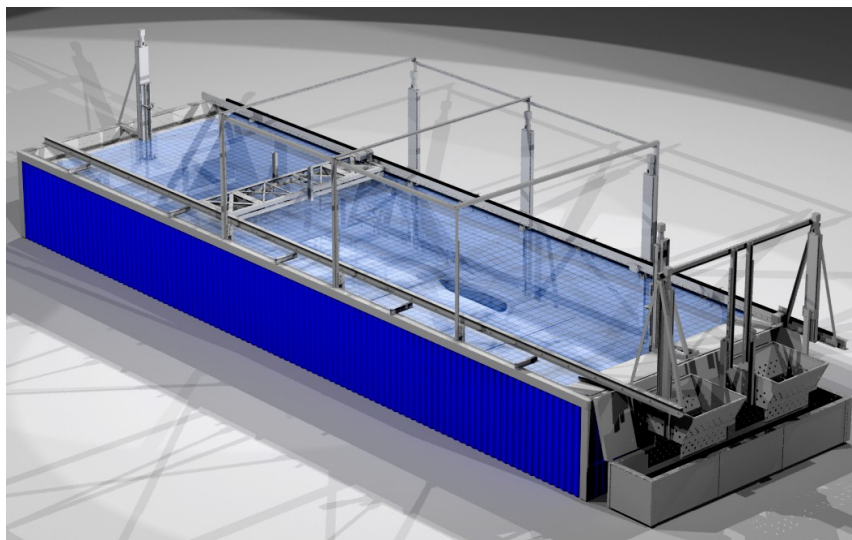


Рис. 3. Общий вид ледового бассейна

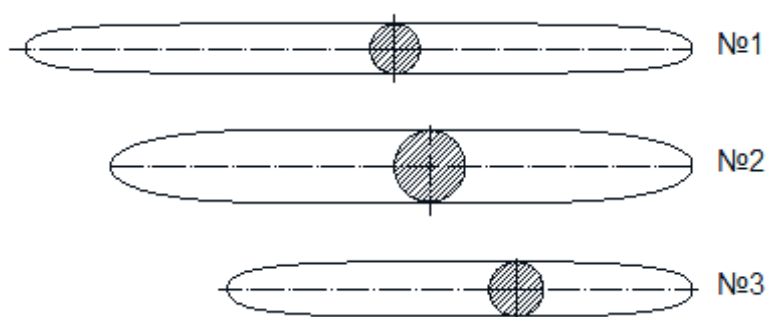


Рис. 4. Схемы моделей подводных судов

Модель ледяного покрова приготавливалась в ледовом бассейне на-мораживанием пресноводного льда без примесей заданной толщины (3 мм) естественным холодом, поэтому исследования проводились толь-ко в зимний период времени (декабрь – январь). Сохранение необходи-мого постоянного температурного режима внутри помещения порядка – 15 °С обеспечивало приготовление ровного сплошного поля модельного льда в течение 2–2,5 ч. Перепад толщины льда у стенок бассейна и в средней части поля не превышал 1 мм. После разрушения модельного поля, лёд удалялся из бассейна, заглубление моделей субмарин выстав-лялось с учётом изменившегося уровня воды в чаше, а поле наморажи-валось вновь.

Для проведения опытов была спроектирована и изготовлена необ-ходимая оснастка и сформирован измерительный комплекс для регист-

рации колебаний модельного льда. В процессе буксировки модели определялась скорость её движения и записывались профили взволнованной поверхности льда. Для записи колебаний модельного льда использовались бесконтактные лазерные датчики LAS-Z компании Way Con (Германия). Профили ИГВ записывались с помощью программы Test.viewer 2.34. Буксировочная система позволяла проводить испытания модели при скоростях до 2,4 м/с в режиме установившегося движения. Конструктивно система была выполнена в виде двух рам, устанавливаемых по разные стороны бассейна и оснащённых подвижными балками с блоками проводки бесконечного буксировочного троса. Изменение скорости буксировки моделей субмарин осуществлялось сервоприводом СПШ20 Сервотехника (Россия).

Время движения модели после выхода её на стационарный режим движения не превышало 4 с., в экспериментах фиксировался момент зарождения и раскрытия трещин в модельном льду, что исключало влияние отражения волн от стенок чаши бассейна на профиль записываемой ИГВ. В модельном льду моделировались продольная раскрытая трещина, а также разводы различной ширины. Относительная ширина разводов b_n/B_m (где b_n — ширина развода) соответственно составляла: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8. Датчик вертикальных перемещений устанавливался на расстоянии 6 м от начала движения модели ПС и на расстоянии 0,01 м от свободной кромки модельного льда.

Для проведения экспериментов использовалась известная методика моделирования [8]. Моделирование естественного льда может осуществляться с использованием различных моделей ледяного покрова, для каждой из которых имеются соответствующие условия подобия.

При использовании естественного льда в качестве модельного толщину моделируемого ледяного покрова будем пересчитывать на натуру по следующей зависимости [9]:

$$h_n = h_m \lambda_i^{4/3} ([\sigma_u]_n / [\sigma_u]_m)^{-1/3},$$

где h_n — толщина натурального льда; h_m — толщина модельного льда; $[\sigma_u]_n$ — предел прочности натурального льда на изгиб; $[\sigma_u]_m$ — предел прочности модельного льда на изгиб (рис. 5).

Определение изгибной прочности модельного льда производилось экспериментально, путём испытания консолей на плаву, для этого использовался намораживаемый лёд толщиной $h_m = 3$ мм. Консоли П-образной формы габаритами $l \times b = 15 \times 45$ мм приготавливаются в модельном льду путём выпиливания по штампу. Усилие, затрачиваемое на разрушение консоли, определялось с помощью электронного динамометра Mark-10 (USA).

Известно, что при моделировании морского льда с помощью пресноводного $E_n > E_m$ (где E_n — модуль Юнга натурального морского льда;

E_m — модуль Юнга модельного пресноводного льда), однако соотношение E/σ_u для морского и пресноводного льдов практически не отличается. Соблюдение этого условия при моделировании льда чрезвычайно важно [10].

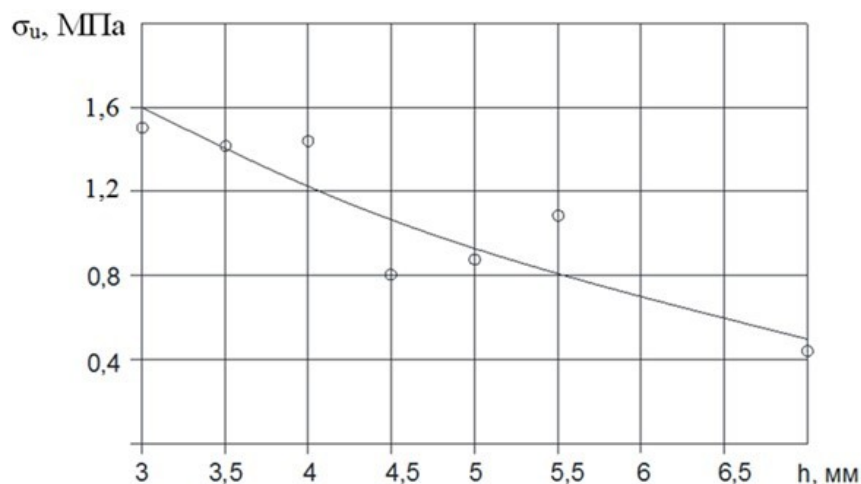


Рис. 5. Осреднённые значения σ_u для льда различной толщины [9]

Чтобы картина трещинообразования была видна более ярко, после формирования модельного поля лёд посыпался тонким слоем снега.

Модельные эксперименты проводились при скоростях $u_m = 1,6 - 2,17$ м/с, глубине погружения моделей $d_m = 0,21$ м и толщине модельного льда $h_m = 3$ мм.

2. Результаты модельных экспериментов

Для сопоставления полученных данных на первом этапе была выполнена серия экспериментов по разрушению сплошного льда моделями ПС. Результаты экспериментов показаны на рисунке 6. Графики показывают, что при скорости движения порядка 2 м/с наблюдалось существенное увеличение прогибов льда. Наиболее эффективное разрушение льда происходило при движении моделей № 2 и № 3. Перемещение моделей № 1 даже на скоростях, близких к критическим, при которых волнообразование во льду было максимальным, к существенному разрушению льда не приводило, несмотря на крупное водоизмещение модели. Низкая ледоразрушающая способность ИГВ было связана с достаточно большим относительным удлинением модели № 1, в результате чего кривизна генерируемых ИГВ была недостаточной для разрушения льда.

Далее были выполнены исследования движения моделей под ледяным покровом, имеющим свободную кромку в виде продольной раскрытой трещины и разводий различной ширины (рис. 7–9).

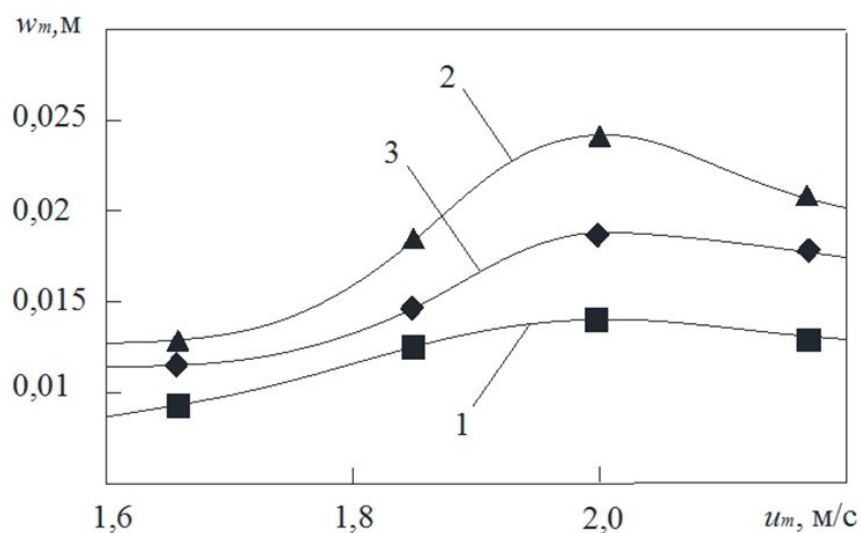


Рис. 6. Зависимость w_m от скорости движения моделей ПС u_m :
1 – модель судна № 1; 2 – модель судна № 2; 3 – модель судна № 3

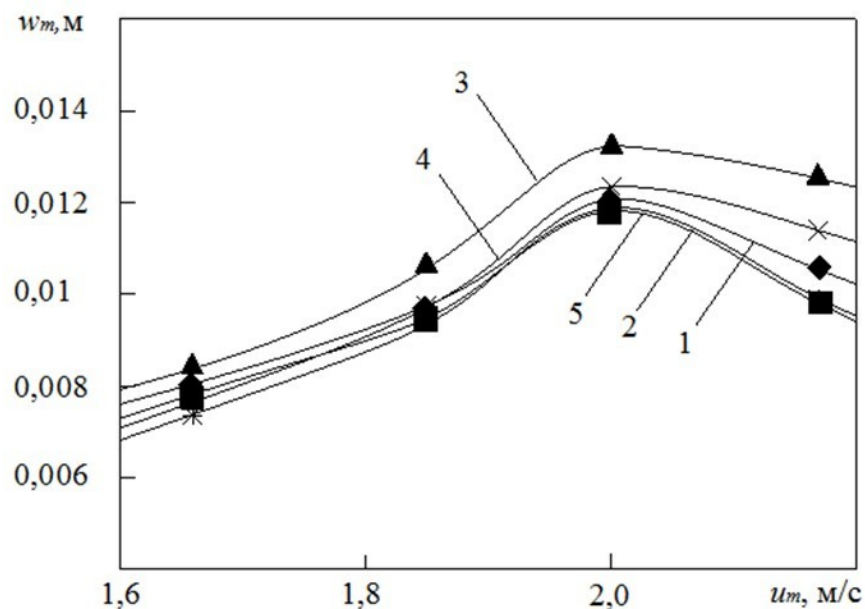


Рис. 7. Зависимость w_m от скорости движения моделей ПС № 1 :
1 – продольная раскрытая трещина; 2 – $b_n/B_m = 0,2$; 3 – $b_n/B_m = 0,4$;
4 – $b_n/B_m = 0,6$; 5 – $b_n/B_m = 0,8$.

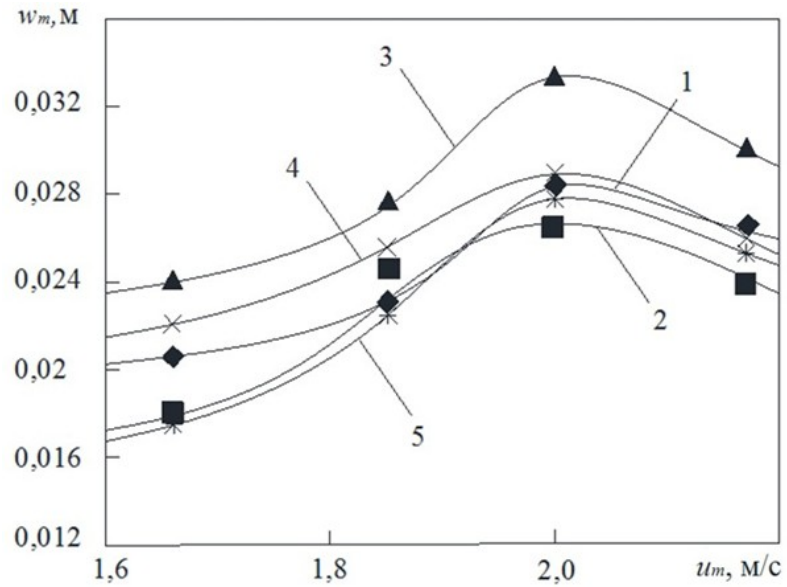


Рис. 8. Зависимость w_m от скорости движения моделей ПС № 2:
1 – продольная раскрытая трещина; 2 – $b_n/B_m = 0,2$; 3 – $b_n/B_m = 0,4$;
4 – $b_n/B_m = 0,6$; 5 – $b_n/B_m = 0,8$.

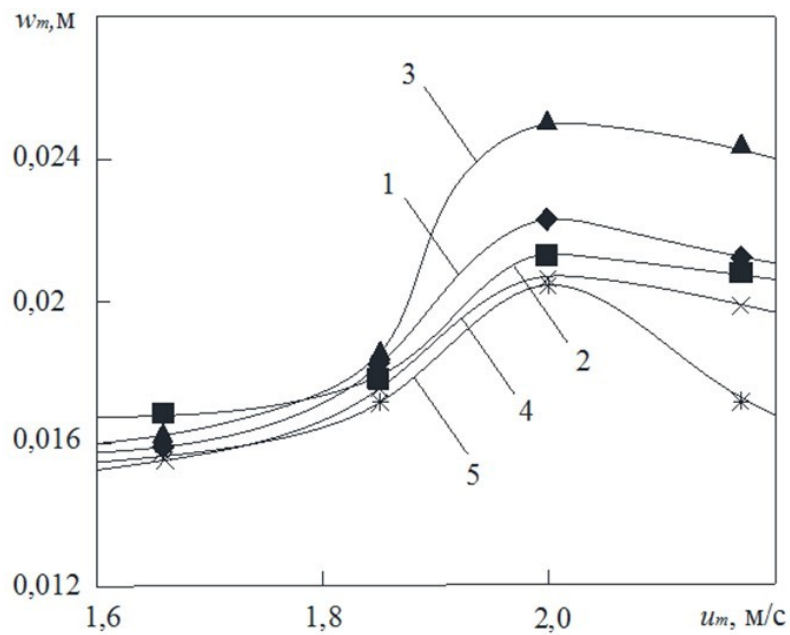


Рис. 9. Зависимость w_m от скорости движения моделей ПС № 3:
1 – продольная раскрытая трещина; 2 – $b_n/B_m = 0,2$; 3 – $b_n/B_m = 0,4$;
4 – $b_n/B_m = 0,6$; 5 – $b_n/B_m = 0,8$.

Эксперименты показали, что наличие свободной кромки оказывает существенное влияние на деформированное состояние модельного льда. Наблюдалось увеличение прогиба модельного льда в зависимости от параметров моделируемых ледовых условий. Так, при $b_n/B_m = 0,4$ наблюдалось резкое увеличение значений w_m . Величина критической скорости, при которой ледоразрушающая способность ИГВ была максимальной, осталась неизменной и так же, как для случая сплошного льда, составила порядка 2 м/с.

Как и для случая сплошного льда, наиболее эффективное разрушение льда ИГВ происходило при движении моделей № 2 и № 3. При движении модели № 1 разрушение льда практически не наблюдалось даже при движении в наиболее благоприятных условиях с критической скоростью (при наличии развода с относительной шириной 0,4). Можно сделать основной вывод, что решающее значение при разрушении льда резонансными ИГВ имеет относительное удлинение ПС, а не его водоизмещение. Для моделей № 2 и № 3 наблюдалось разрушение льда независимо от моделируемых ледовых условий во всём диапазоне исследуемых скоростей (рис. 10).



Рис. 10. Характер разрушения ледяного покрова моделью № 2 при движении вдоль продольной трещины, $u_m = 1,66$ м/с

При скоростях, близких к критическим, площадь разрушения льда была максимальной, а при докритических начинала уменьшаться (рис. 11). При скоростях больше 2 м/с также наблюдалось интенсивное разрушение льда, однако площадь льдин была наибольшей.



Рис. 11. Характер разрушения ледяного покрова моделью № 3
при $b_n/V_m = 0,4$, $u_m = 1,85$ м/с



Рис. 12. Характер разрушения ледяного покрова моделью № 3
при $b_n/V_m = 0,6$, $u_m = 2$ м/с



Рис. 13. Характер разрушения ледяного покрова моделью № 3
при $b_n/V_m = 0,8$, $u_m = 2$ м/с

Наличие свободной кромки показало, что интенсивное появление магистральных трещин происходило при движении моделей вдоль продольной трещины и при $b_n/B_m = 0,4$ (рис. 10–11). С ростом ширины развода интенсивность разрушения снижалась (рис. 12–13).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турко С. В. Применение подводных лодок в Арктике // Роль российского флота в защите отечества: материалы III международной научно-практической конференции. Тверь, 2008. С. 18–26.
2. Хейсин Д. Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 216 с.
3. Козин В. М., Онищук А. В., Марьин Б. Н. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов. Владивосток: Дальнаука, 2005. 191 с.
4. Kozin V. M., Zemlak V. L., Chizhiumov S. D. Mathematical Model of Ice Sheet Deformation Caused by Submarine Motion // Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, China, June 20–25, 2010. Pp. 1171–1176.
5. Zemlyak V. L., Kozin V. M., Baurin N. O., Petrosyan G. V. Influence of Peculiarities of the Form of a Submarine Vessel on the Parameters of Generated Waves in the Ice Motion // Proceedings of the Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference Busan, Korea, June 15–20, 2014. Pp. 1135–1140.
6. Земляк В. Л., Баурин Н. О., Курбацкий Д. А. Лаборатория «Ледотехники» // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. № 1(12). С. 68–77.
7. Войткунский Я. И. Сопротивление движению судов. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.
8. Козин В. М., Онищук А. В., Марьин Б. Н. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов. Владивосток: Дальнаука, 2005. 191 с.
9. Козин В. М. Обоснование исходных данных для выбора основных параметров СВП, предназначенных для разрушения ледяного покрова резонансным способом: дисс. ... канд. техн. наук. Горький: ГПИ им. А. А. Жданова, 1983. 314 с.
10. Козин В. М., Земляк В. Л., Баурин Н. О., Ипатов К. И. Технология определения физико-механических свойств модельного льда // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема, 2016. № 4 (25). С. 32–40.
11. Lewis J. W. Recent Development in Physical Ice Modeling // Offshore Technol. Conf. Houston. Texas. 1982. Vol. 4. Pp. 493–498.

* * *

**Zemliak Vitaliy L., Kozin Victor M., Rogozhnikova Elena G.,
Radionov Sergey V., Kononov Ivan A.**
**INFLUENCE OF CRACKS AND ICE FRACTURE ON INTENSITY
OF EXCITED BENDING-GRAVITATIONAL WAVES FROM
THE MOTION OF A IMMERSED BODY**

^{1, 4, 5} Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan;

² Institute of Machining and Metallurgy, FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur;

³ Amur State University of Humanities and Pedagogy, Komsomol'sk-on-Amur)

Previously the authors have experimentally determined that the effectiveness and failure pattern of ice cover caused by flexural-gravity waves generated from the motion of submerged body near ice can greatly depend on the presence in the ice of a free edge. In turn, the influence on the parameters of FGW is also exerted by the characteristics of the immersed body (length, width, the presence of a cylindrical insert). The experiments allowed us to find dependencies of

the parameters of flexural gravity waves on the characteristics of the models and ice conditions (longitudinal crack, ice fracture different widths). Ice cover failure pattern determined. Modes of motion at which ice breaking was most intensive are detected.

Keywords: submarine vessels, ice, flexural-gravity waves, longitudinal crack, ice fracture.

REFERENCES

1. Turko S. V. Application of submarines in the Arctic [Primenenie podvodnykh lodok v Arktike], *Rol rossiiskogo flota v zashchite otechestva: materialy III mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Materials of the III International Scientific and Practical Conference «The Role of the Russian Fleet in the Defense of the Country»), Tver, 2008, pp. 18–26.
2. Kheisin D. E. *Dinamika ledianogo pokrova* (Dynamics of Ice Cover), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1967. 216 p.
3. Kozin V. M., Onishchuk A. V., Marin B. N. *Ledorazrushaiushchaia sposobnost izgibno-gravitatsionnykh voln ot dvizheniia obektov* (The Ice-Breaking Capacity of Flexural-Gravity Waves Produced by Motion of Objects), Vladivostok, Dalnauka Publ., 2005. 191 p.
4. Kozin V. M., Zemlak V. L., Chizhiumov S. D. Mathematical Model of Ice Sheet Deformation Caused by Submarine Motion, *Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Beijing, China, June 20–25, 2010, pp. 1171–1176.
5. Zemlyak V. L., Kozin V. M., Baurin N. O., Petrosyan G. V. Influence of Peculiarities of the Form of a Submarine Vessel on the Parameters of Generated Waves in the Ice Motion, *Proceedings of the Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference*, Busan, Korea, June 15–20, 2014, pp. 1135–1140.
6. Zemlyak V. L., Baurin N. O. and Kurbachiy D. A. Laboratory «Ice technology» [Laboratoriya «Ledotekhniki»], *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleykhema*, 2013, no. 1(12). pp. 68–77.
7. Voitkanskii Ia. I. *Soprotivlenie dvizheniiu sudov* (Handbook of ship theory), Leningrad, Sudostroenie Publ., 1988. 288 p.
8. Kozin V. M., Onishchuk A. V., Marin B. N. *Ledorazrushaiushchaia sposobnost izgibno-gravitatsionnykh voln ot dvizheniia obektov* (The Ice-Breaking Capacity of Flexural-Gravity Waves Produced by Motion of Objects), Vladivostok, Dalnauka Publ., 2005. 191 p.
9. Kozin V. M. *Obosnovanie iskhodnykh dannyykh dlya vybora osnovnykh parametrov SVP, prednaznachennykh dlya razrusheniya ledyanogo pokrova rezonansnym sposobom* (Substantiation of Initial Data for Choosing Basic Parameters for Hovercraft Designed for Breaking Ice Cover by Resonant Method), Thesis for Candidate of Technical Sciences, Gorkii, GPI im. A. A. Zhdanova Publ., 1983. 314 p.
10. Kozin V. M., Zemlyak V. L., Baurin N. O., Ipatov C. I. Technology Definition of Physical and Mechanical Properties of Model Ice [Tekhnologiya opredeleniia fiziko-mekhanicheskikh svoystv modelnogo lda], *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleykhema*, 2016, no. 4(25), pp. 32–40.
11. Lewis J. W. Recent Development in Physical Ice Modeling, *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, 1982, vol. 4, pp. 493–498.

УДК 631.354

М. В. Канделя, В. П. Назарова**АППАРАТ РЕЖУЩИЙ ЖАТВЕННОЙ МАШИНЫ**

В статье рассмотрен вариант конструкции аппарата режущего жатвенной машины на уборке бобовых культур, преимущественно сои.

Ключевые слова: аппарат режущий, жатвенная машина, сегмент, пальцы открытого типа, кривая третьего порядка, координаты Циссоиды Диоклеса.

Известен режущий аппарат жатвенных машин по авторскому свидетельству СССР (№ 974963, МПК A01 D55/02, опубликовано 23.11.82. Бюллетень № 43), у которого палец режущего аппарата имеет усечённый тупообразный конец, режущий сегмент, противорежущую пластину трапецевидной формы, расположенную большим основанием в сторону направления движения машины.

Один из недостатков этого режущего аппарата заключается в том, что ширина переднего носка усечённого тупообразного конца пальца настолько велика, что в крайних положениях ножа режущего аппарата, когда скорость его равна нулю, передний носок вкладыша выступает за боковые кромки сегмента, то есть сегмент перекрывает всю ширину переднего носка вкладыша, что способствует отталкиванию стеблей срезаемой бобовой культуры непокрытыми сегментом ножа передними кромками вкладыша и при уборке легко осыпаемых культур, преимущественно сои, увеличивает потери.

Кроме этого, в случае полёглости стеблей сои, усечённый тупообразный конец пальца режущего аппарата способствует нагребанию полёгших стеблей вместе с землёй с последующим забиванием режущего аппарата и остановкой жатвенной машины.

Также известен режущий аппарат уборочной машины по патенту РФ [3], включающий пальцы открытого типа, нож с сегментами, регулируемые прижимы, при этом пальцы открытого типа выполнены из листовой конструкционной или инструментальной углеродистой стали методом горячей штамповки с припуском на обработку горизонтальной

Канделя Михаил Васильевич — кандидат технических наук, профессор (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: kandelya79@mail.ru.

Назарова Вероника Павловна — студент (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: student.nika1661@mail.ru.

© Канделя М. В., Назарова В. П., 2017

поверхности режущих кромок, а вершина сегмента ножа свисает с переднего носка пальца.

Этот режущий аппарат уборочной машины обеспечивает низкий срез, а также высокую надёжность в работе и выполнении технологического процесса.

Однако при уборке полёглой сои, когда часть стеблей вместе с бобами лежит на поверхности почвы ниже плоскости резания, после скашивания их режущим аппаратом бобы, что находились ниже плоскости резания, останутся на поверхности почвы как потери, а часть бобов, что попали в плоскость резания, перерезается, отходя в потери.

Режущий аппарат, имея низкий срез, «зачерпывает» почву, которая попадает сначала на платформу жатки, а затем в молотильное устройство, замуравывая отверстия подбарабана.

Кроме этого, болты и гайки, крепящие регулируемый прижим, препятствуют прохождению массы, способствуя осыпанию сои в зоне режущего аппарата.

Цель работы:

1. Уменьшить потери сои за счёт низкого среза и качественного подъёма полёглых стеблей и бобов;
2. Исключить попадание земли в режущий аппарат.

Указанная цель достигается тем, что в нижней части каждого пальца открытого типа в продольно-вертикальной плоскости симметрично его режущим кромкам закреплены ножевидные пластины, носки которых располагаются впереди концов пальцев открытого типа, при этом точка пересечения линии верхней части ножевидной пластины, проведённой из её носка под углом α° к горизонту, с вертикальной линией, проведённой на уровне концов пальцев открытого типа, расположена выше плоскости резания, а линия нижней части, также проведённая из носка ножевидной пластины до пересечения с этой же вертикальной линией снизу, выполнена по алгебраической кривой третьего порядка: $x^3 = y^2(D - x)$ по одной из ветвей Циссоиды Диоклеса с заданным диаметром $D = C = \cos \alpha^\circ (H_1 + H_2)$, переходящая после пересечения с вертикальной линией на уровне концов пальцев открытого типа в параллельную горизонту линию, где:

C – расстояние от конца пальца открытого типа до носка ножевидной пластины;

« x » и « y » – координаты Циссоиды Диоклеса;

α° – угол подъёма линий верхней части ножевидной пластины, проведённой из её носка;

H_1 – расстояние от плоскости резания до почвы;

H_2 – высота расположения над плоскостью резания точки пересечения линии верхней части ножевидной пластины, проведённой из её носка под углом α° к горизонту, с вертикальной линией, расположенной на уровне концов пальцев открытого типа.

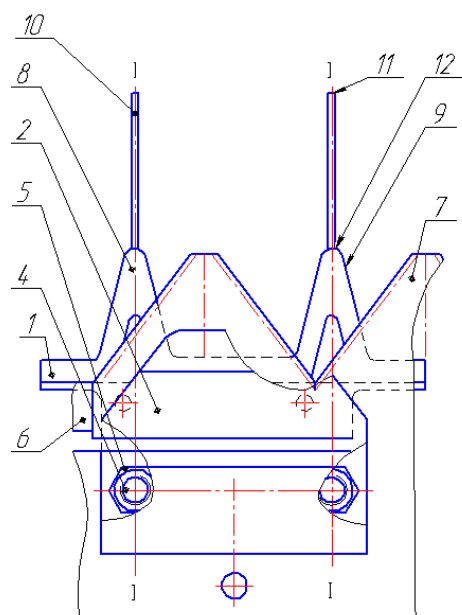


Рис. 2. Аппарат режущий жатвенной машины (вид сверху)

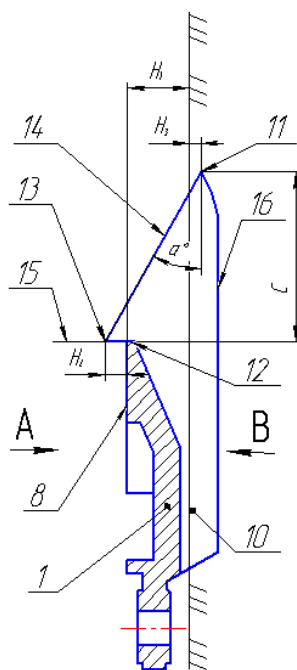


Рис. 3. Палец открытого типа и ножевидные пластины, выполненные одной деталью (вид сбоку, в разрезе)

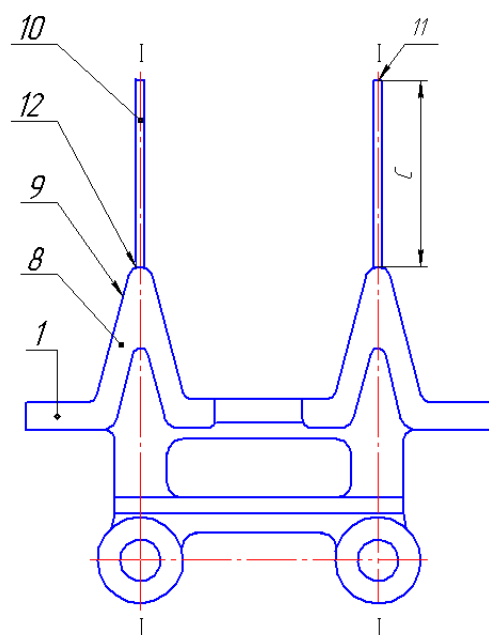


Рис. 4. Вид А рисунка 3

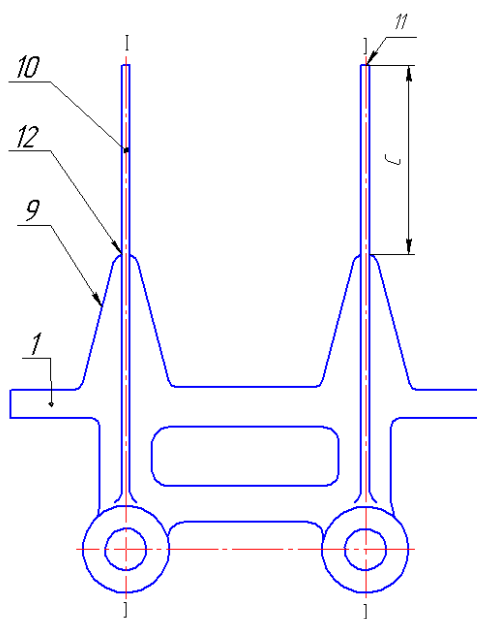


Рис. 5. Вид В рисунка 3

Стебли сои, попадая между лезвием сегмента ножа 7, ножа 6 и режущей кромкой 9 пальца открытого типа 1, срезаются.

При движении жатвенной машины по полю ножевидные пластины 10, закреплённые в нижней части каждого пальца открытого типа 1 в продольно-вертикальной плоскости I-I симметрично его режущим кромкам 9, носки 11 которых располагаются впереди концов 12 пальцев открытого типа 1, заглубляются в почву, поднимая своей верхней 14 частью стебли и бобы сои.

Так как точка 13 пересечения линии верхней 14 части ножевидной пластины 10, исходящей из её носка 11 под углом α° к горизонту, с вертикальной линией 15, проведённой на уровне концов 12 пальцев открытого типа 1, расположена выше плоскости резания 8, то поднятые верхней 14 частью ножевидной пластины 10 стебли сои и бобы не останутся на поверхности поля и не попадут в зону плоскости резания 8, при этом ножевидные пластины 10 будут разрушать корку верхнего слоя почвы, разрыхляя его, не позволяя комочкам почвы подниматься по наклонной верхней 14 части ножевидной пластины 10, которые с неё скатываются ввиду малой толщины ребра верхней 14 части ножевидной пластины 10.

Кроме этого, образуется побочный положительный эффект от разрушения корки почвы и её рыхления — провоцирование прорастания сорняков на убранном участке поля.

Для исключения сгуживания почвы перед носком 11 ножевидной пластины 10 линия нижней 16 её части, исходящая также из носка 11 до пересечения с вертикальной 15 линией снизу, выполнена по алгебраической кривой третьего порядка: $x^3 = y^2(D - x)$ по одной из ветвей Циссоиды Диоклеса с заданным диаметром $D = C = \cos \alpha^\circ (H_1 + H_2)$, переходящая после пересечения с вертикальной 15 линией на уровне концов 12 пальцев открытого типа 1 в параллельную горизонту линию, где:

C — расстояние от конца 12 пальца открытого типа 1 до носка 11 ножевидной пластины 10;

« x » и « y » — координаты Циссоиды Диоклеса;

α° — угол подъёма линий верхней 14 части ножевидной пластины 10, проведённой из её носка 11;

H_1 — расстояние от плоскости резания 8 до почвы;

H_2 — высота расположения над плоскостью резания 8 точки 13 пересечения линии верхней 14 части ножевидной пластины 10, проведённой из её носка 11 под углом α° к горизонту, с вертикальной 15 линией, расположенной на уровне концов 12 пальцев открытого типа 1.

Выполнение пальца открытого типа 1 и ножевидной пластины 10 одной деталью значительно повышает их жёсткость и прочность.

Величина заглубления носка 11 ножевидной пластины 10 пальца открытого типа 1 в почву на глубину $H_3 = 5-8$ мм позволяет избежать взаимодействия ножевидной пластины 10 с корневой системой бобовых культур, преимущественно сои.

Благодаря тому, что верхняя часть прижима 2 перекрывает болты 4 и гайки 5, крепящие прижимы 2 и пальцы открытого типа 1 к гибкому пальцевому брусу 3, устраняется препятствие для прохождения массы сои в зоне режущего аппарата.

Применение предлагаемого аппарата режущего жатвенной машины позволит:

- 1) уменьшить потери сои за счёт низкого среза и качественного подъёма полёглых стеблей и бобов;
- 2) исключить попадание земли в режущий аппарат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аппарат режущий жатвенной машины: пат. №2525770 РФ: МПК A01D 34/02 / Канделя М. В., Канделя Н. М., Шпилко П. А., Емельянов А. М., Рябченко В. Н., Щитов С. В., Линкаль А. В.; патентообладатель Дальневосточный гос. аграрный университет. № 2013108530/13; заявл. 26.02.2013; опубл. 20.08.2014. Бюл. № 23.
2. Канделя М. В. Жатка ЖУКК-4,1 на заготовке кормов // Сельский механизатор. 2013. № 6 (52). С. 40.
3. Режущий аппарат уборочной машины: пат. № 2363136 РФ: МПК A01D 34/13 / Бумбар И. В., Канделя М. В., Рябченко В. Н., Шпилко П. А.; патентообладатель Дальневосточный государственный аграрный университет. № 2008102579/12; заявл. 22.10.2008; опубл. 10.08.2009. Бюл. № 22.

* * *

Kandelya Mikhail V., Nazarova Veronika P.
THE CUTTING APPARATUS OF A REAPING MACHINE
 (Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan)

The article describes the embodiment of the cutting apparatus of reaping machine for harvesting legumes, mainly soybeans.

Keywords: cutting machine, reaping machine, segment, fingers open, a cubic curve, the coordinates of Cissoïd of Diocles.

REFERENCES

1. Kandelia M. V., Kandelia N. M., Shpilko P. A., Emelianov A. M., Riabchenko V. N., Shchitov S. V., Linkal A. V. *Apparat rezhushchii zhatvennoi mashiny* (Cutting machine for reapers), patent No. 2525770 of the Russian Federation, IPC A01D 34/02, patent holder Far Eastern State Agrarian University, publ. 08/20/2014. Bulletin No. 23.
2. Kandelia M. V. Header ЖУКК-4,1 on fodder preparation [Zhatka ZhUKK-4,1 na zagotovke kormov], *Selskii mekhanizator*, 2013, no. 6 (52), pp. 40.
3. Bumbar I. V., Kandelia M. V., Riabchenko V. N., Shpilko P. A. *Rezhushchii apparat uborochnoi mashiny* (Cutting device harvesting machine), patent No. 2363136 of the Russian Federation, IPC A01D 34/13, patent holder Far Eastern State Agrarian University, publ. 10/08/2009. Bulletin No. 22.

* * *

УДК 631.354.026

М. В. Канделя, В. П. Назарова**УСТРОЙСТВО МОЛОТИЛЬНОЕ ДВУХБАРАБАННОЕ**

В статье рассмотрен вариант конструкции устройства молотильного двухбарабанного, которое может быть использовано в зерноуборочных комбайнах и стационарных молотилках. Данное решение позволит активизировать зоны сепарации зерна через промежуточную и направляющую решётки промежуточного и отбойного битеров, уменьшающих дробление зерна и увеличивающих пропускную способность.

Ключевые слова: устройство молотильное, зерноуборочный комбайн, сепарация зерна, промежуточный и отбойный бите́р, пропускная способность.

Известно молотильное устройство по авторскому свидетельству СССР № 432883 М. кл. А01f 12/18, А01f 12/24, бюллетень № 23 от 15.06.1974 г., содержащее два молотильных барабана с подбарабанами, промежуточный бите́р с промежуточной решёткой, отбойный бите́р с направляющей решёткой, при этом подбарабаны состоят из выступающих обмолачивающих планок, утопающих обмолачивающих планок и прутков, проходящих через отверстия выступающих обмолачивающих планок.

Основным недостатком молотильного устройства по авторскому свидетельству СССР № 432883 является неполная сепарация вымолоченного барабанами зерна через промежуточную и направляющие решётки промежуточного и отбойного битеров, поэтому не выделившееся через промежуточную решётку вымолоченное зерно, поступая во второй барабан, дробится и перегружает сепарирующую поверхность подбарабана второго барабана, способствуя меньшему объёму выделения зерна, вымолоченному вторым барабаном.

Недостаточная сепарация зерна через направляющую решётку увеличивает потери зерна на соломотрясе.

Известно молотильное устройство по авторскому свидетельству СССР № 325935, М. кл. А01f 12/00, опубликовано 19.01.1972 г., бюллетень № 4, содержащее два молотильных барабана с подбарабанами, которые соединены промежуточной решёткой, над которой в промежутке между

Канделя Михаил Васильевич — кандидат технических наук, профессор (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхе́ма, Биробиджан); e-mail: kandelya79@mail.ru.

Назарова Вероника Павловна — студент (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхе́ма, Биробиджан); e-mail: student.nika1661@mail.ru.

© Канделя М. В., Назарова В. П., 2017

молотильными барабанами находятся два битера. Под промежуточной решёткой между бiteraми установлена вращающаяся гребёнка, зубья которой проходят между прутками решётки. За вторым барабаном установлен отбойный бiter с направляющей решёткой.

В этом молотильном устройстве за счёт введения под промежуточной решёткой вращающейся гребёнки значительно улучшилась сепарация вымолоченного первым барабаном зерна, поступившего на промежуточную решётку.

Однако с изменением условий уборки — влажность, засорённость убираемого хлебного массива — на валу вращающейся гребёнки накапливаются растительные остатки, которые со временем вынуждают остановиться вращающуюся гребёнку, что резко ухудшает сепарацию вымолоченного первым барабаном зерна, поступившего на промежуточную решётку. Кроме этого, недостаточная сепарация зерна через направляющую решётку увеличивает потери зерна на соломотрясе.

Цель работы: активизировать зоны сепарации зерна через промежуточную и направляющую решётки промежуточного и отбойного битеров, уменьшающих дробление зерна и увеличивающих пропускную способность устройства молотильного двухбарабанного.

Эта цель достигается тем, что промежуточный и отбойный битера оснащены пальчиковым механизмом, при этом прутки промежуточной и направляющей решёток в продольно-вертикальной плоскости выполнены по алгебраической кривой 3-го порядка:

$$x^3 = y^2 \cdot (D - x),$$

по одной из ветвей Циссоиды Диоклеса с заданным диаметром « D », равным диаметру вращения промежуточного и отбойного битеров, а « x » и « y » — координаты Циссоиды Диоклеса.

На рисунке изображено предлагаемое устройство молотильное двухбарабанное — продольный разрез.

Устройство молотильное двухбарабанное содержит подбарабанье 1 с первым 2 молотильным барабаном, промежуточную 3 решётку с промежуточным 4 битером, подбарабанье 5 со вторым 6 молотильным барабаном, направляющую 7 решётку с отбойным 8 битером.

Промежуточный 4 и отбойный 8 битера оснащены пальчиковым механизмом 9, при этом прутки промежуточной 3 и направляющей 7 решёток в продольно-вертикальной плоскости выполнены по алгебраической кривой 3-го порядка:

$$x^3 = y^2 \cdot (D - x),$$

по одной из ветвей Циссоиды Диоклеса с заданным диаметром « D », равным диаметру вращения промежуточного 4 и отбойного 8 битеров, а « x » и « y » — координаты Циссоиды Диоклеса.

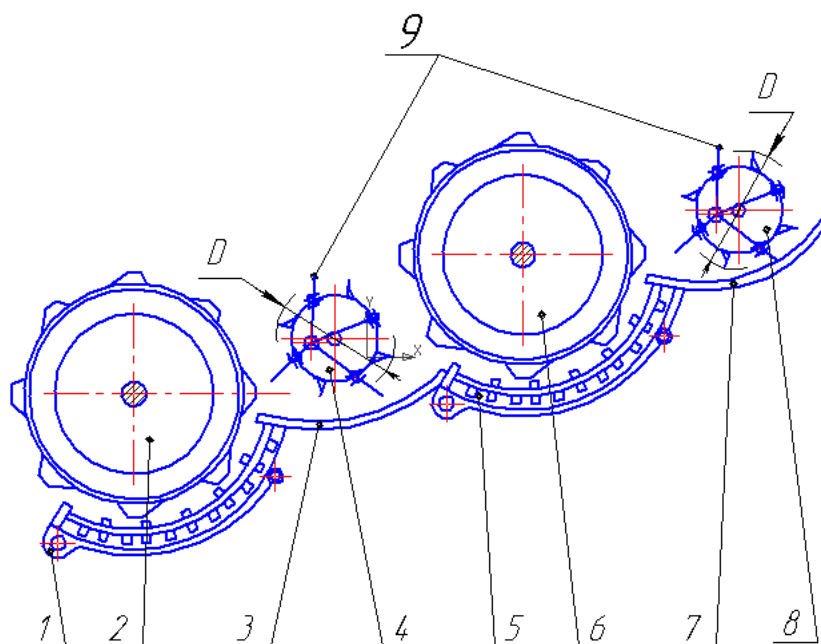


Рис. Устройство молотильное двухбарабанное (продольный разрез)

При работе устройства молотильного двухбарабанного хлебная масса подаётся между подбарабаньем 1 и первым 2 барабаном, где вымолачивается наиболее спелое зерно, при этом часть вымолоченного зерна выделяется через подбарабанье 1, а остальное с хлебной массой подаётся на промежуточную 3 решётку, прутки которой в продольно-вертикальной плоскости выполнены по алгебраической кривой 3-го порядка:

$$x^3 = y^2 \cdot (D - x),$$

по одной из ветвей Циссоиды Диоклеса с заданным диаметром « D », равным диаметру вращения промежуточного 4 и отбойного 8 битеров, а « x » и « y » — координаты Циссоиды Диоклеса.

Далее хлебная масса промежуточным 4 битером, оснащённым пальчиковым механизмом 9, транспортируется в промежуток между подбарабаньем 5 и вторым 6 молотильным барабаном.

Поступившая ко второму 6 барабану хлебная масса домолачивается, при этом часть вымолоченного зерна выделяется через подбарабанье 5, а остальное, как и в первом случае, с хлебной массой поступает на направляющую 7 решётку, прутки которой также в продольно-вертикальной плоскости выполнены по алгебраической кривой 3-го порядка:

$$x^3 = y^2 \cdot (D - x),$$

по одной из ветвей Циссоиды Диоклеса с заданным диаметром « D », равным диаметру вращения промежуточного 4 и отбойного 8 битеров, а « x » и « y » — координаты Циссоиды Диоклеса.

Далее хлебная масса отбойным 8 битером, также оснащённым пальчиковым механизмом 9, транспортируется на сепарирующие органы, например, соломотряс (на рисунке не показано).

Оснащение промежуточного 4 и отбойного 8 битеров пальчиковым механизмом 9 позволяет активно воздействовать на хлебную массу, находящуюся на промежуточной 3 и направляющей 7 решётках, прутки которых в продольно-вертикальной плоскости выполнены по алгебраической кривой 3-го порядка:

$$x^3 = y^2 \cdot (D - x),$$

по одной из ветвей Циссоиды Диоклеса с заданным диаметром « D », равным диаметру вращения промежуточного 4 и отбойного 8 битеров, а « x » и « y » — координаты Циссоиды Диоклеса, позволяет активизировать зоны сепарации зерна через промежуточную 3 направляющую 7 решётки промежуточного 4 и отбойного 8 битеров, уменьшающих дробление зерна и увеличивающих пропускную способность устройства молотильного двухбарабанного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дека молотильного устройства: пат. № 2516135 РФ: МПК A01F 12/24 / Канделя М. В., Тихончук П. В., Шилько П. А.; патентообладатель Дальневосточный государственный аграрный университет. № 2012155663/13; заявл. 20.12.2012; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14. 10 с.
2. Канделя М. В., Шилько П. А., Земляк В. Л., Ипатов К. И. Молотильное устройство // Сельский механизатор. 2016. № 3. С. 6–7.
3. Канделя М. В. Эволюция молотильных устройств гусеничных рисозерноуборочных комбайнов // Техника и оборудование для села. 2013. № 3 (189). С. 13–14.
4. Устройство молотильное двухбарабанное: пат. № 2514302 РФ: МПК A01F 12/26 / Канделя М. В., Тихончук П. В., Шилько П. А.; патентообладатель Дальневосточный государственный аграрный университет. № 2012155661/13; заявл. 20.12.2012; опубл. 27.04.2014, Бюл. № 12. 6 с.

* * *

Kandelya Mikhail V., Nazarova Veronika P.

THE DOUBLE-DRUM THRESHING DEVICE

(Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan)

The article describes the structure of double-drum threshing device that can be used in combine harvesters and stationary threshers. This solution will allow to intensify the zone of separation of the grain through the intermediate and grille guide promezhutochnogo and cutting tines reduce the grinding of grain and increase throughput.

Keywords: device, threshing, combine harvester, grain separation, intermediate and fender beater, missing the ability.

REFERENCES

1. Kandelia M. V., Tikhonchuk P. V., Shilko P. A. *Deka molotilnogo ustroistva* (The threshing device deck), patent No. 2516135 of the Russian Federation, IPC A01F 12/24, patent holder Far Eastern State Agrarian University, publ. 20/05/2014, Bulletin No. 14. 10 p.
2. Kandelia M. V., Shilko P. A., Zemliak V. L., Ipatov K. I. Threshing device [Molotilnoe ustroistvo], *Selskii mekhanizator*, 2016, no. 3, pp. 6–7.
3. Kandelya M. V. Evolution of Threshing Devices of Tracklaying Rice and Grain Harvesters [Evolyutsiya molotil'nykh ustroystv gusenichnykh risozernouбороchnykh kombaynov], *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*, 2013, no. 3, pp. 13–14.
4. Kandelia M. V., Tikhonchuk P. V., Shilko P. A. *Ustroistvo molotilnoe dvukhbarabannoe* (Device threshing two-drum), patent No. 2514302 of the Russian Federation, IPC A01F 12/26, patent holder Far Eastern State Agrarian University, publ. 04/27/2014, Bulletin No. 12. 6 p.

* * *

УДК.624.011.78

О. А. Одинокова, А. А. Доко**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
РАБОТЫ ДРЕВЕСИНЫ**

Были произведены испытания опытных образцов из древесины (сосна второго сорта) на разрушающую нагрузку для установления пределов прочности опытного образца и дальнейшего использования полученных результатов исследования в расчётах на прочность. По результатам эксперимента методом неразрушающих воздействий было выяснено, что принятый для исследования материал при полученных данных эксперимента методом разрушающих воздействий и продолжительности эксперимента 8 минут не обладает ползучестью. Однако у исследованных образцов наблюдалась ярко выраженная разномодульность при растяжении и сжатии. По результатам эксперимента были более детально изучены свойства древесины для оптимизации расчётов.

Ключевые слова: свойства древесины, разрушающие нагрузки, растяжение древесины, сжатие древесины, смятие древесины, прочность древесины, лабораторная машина Хёштрафт, лабораторная машина Ум-5А.

Для изучения работы древесины была принята древесина (сосна 2-го сорта). В данном пункте были проведены исследования принятого материала на разрушающие нагрузки.

Работа древесины на растяжение

Древесина работает на растяжение почти как упругий материал и показывает высокую прочность. Разрушение растянутых элементов происходит хрупко, в виде почти мгновенного разрыва наиболее слабых волокон по пилообразной поверхности.

Для определения разрушающей нагрузки при растяжении вдоль волокон был проведён эксперимент на лабораторной машине Хёштрафт 10000 кПа (пр-во Германия).

Экспериментальный образец представлен на рисунке 1.

В ходе испытания было установлено, что для достижения разрушающей растягивающей нагрузки необходимо зажать опорные головки образца с такой силой, которая приводит к неправильной его работе, а именно происходит смятие образца в области опорных головок, вследствие чего происходит срез образца (рис. 2).

Одинокова Ольга Анатольевна — доктор технических наук, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства (Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск); e-mail: odi@mail.ru.

Доко Александр Александрович — инженер-конструктор 2 категории (ООО «МС ПРОЕКТ групп», Хабаровск).

© Одинокова О. А., Доко А. А., 2017

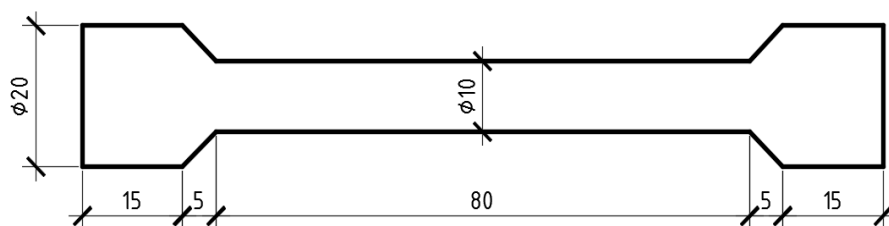


Рис. 1. Экспериментальный образец на растяжение

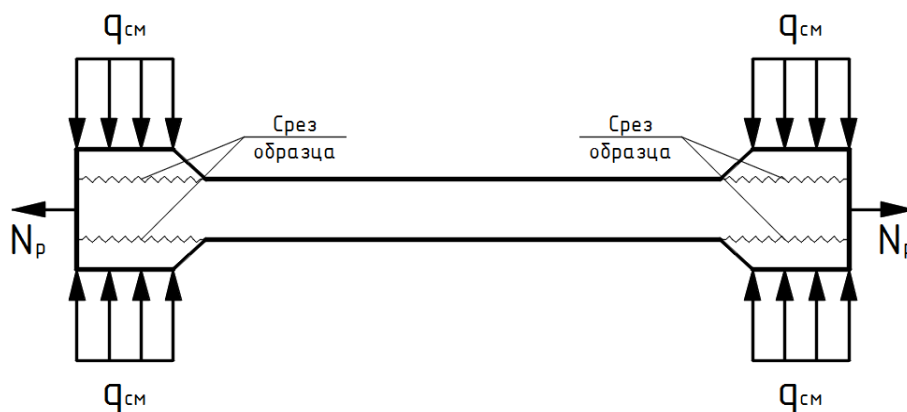


Рис. 2. Срез образца в местах сильного обжатия пресс-формой

Для получения более точных результатов исследования выбранного материала необходимо исключить смятие опорных головок посредством расчёта на смятие:

$$\frac{N_{CM}}{A_{CM}} J R_{CM},$$

где $N_{CM} = 500 \text{ кг}$ — сжимающая сила;

A_{CM} — площадь сечения, подверженная смятию;

$R_{CM} = 3 \text{ МПа}$ — прочность древесины при смятии (поперёк волокон),

$$A_{CM} J \frac{5}{3000} = 0,00167 \text{ м}^2 = 16,7 \text{ см}^2.$$

Исходя из принятой опорной длины, равной $b = 70 \text{ мм}$, определяем необходимый размер поперечного сечения:

$$a = \frac{A_{CM}}{b} = \frac{16,7}{7,0} = 2,39 \text{ см}.$$

Принят образец с опорными головками размером 70×30 мм. Принятые размеры испытываемого образца представлены на рисунке 3.

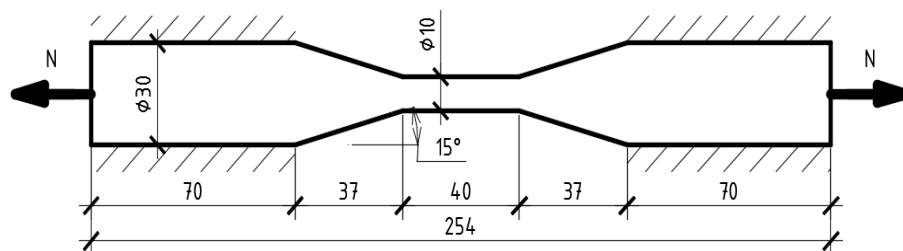


Рис. 3. Размеры принятого образца, схема загрузки



Рис. 4. Испытываемый образец на растяжение:
а) до разрушения; б) после разрушения

Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Обработка полученных результатов образца на растяжение

№ п/п	Разрушающая нагрузка N , кг	Площадь поперечного сечения образца: $A = \pi \cdot r^2$, см ²	Разрушающее напряжение: $\sigma_p = \frac{N}{A}$, МПа	Напряжение с учётом коэффициента запаса $k = 1,4$	Усреднённое значение напряжения: $\sigma = \frac{\sigma_p}{[K]}$, МПа
1	880	0,785	112,10	80,08	88,56
2	1000		127,38	90,98	
3	1040		132,48	94,62	

Разрушение древесины при растяжении начинается со скольжения мицелл и заканчивается разрывом волокон. Разрыв древесины происходит при малых деформациях (менее 1 %) и носит хрупкий характер.

Работа древесины на сжатие

В сечениях элемента от сжимающего усилия N , действующего вдоль его оси, возникают почти одинаковые по величине сжимающие напряжения σ . Древесина работает на сжатие надёжно, но не вполне упруго.

Примерно до половины предела прочности рост деформаций происходит по закону, близкому к линейному, и древесина работает почти упруго. При дальнейшем росте нагрузки увеличение деформаций всё более опережает рост напряжений, указывая на упругопластический характер работы древесины. Разрушение образцов происходит при напряжениях, достигающих 47 МПа, пластично в результате потери устойчивости ряда волокон, о чём свидетельствует характерная складка.

Для определения разрушающей нагрузки при сжатии вдоль волокон был проведён эксперимент на лабораторной машине Ум-5А (пр-во Россия). Экспериментальный образец представлен на рисунке 5.

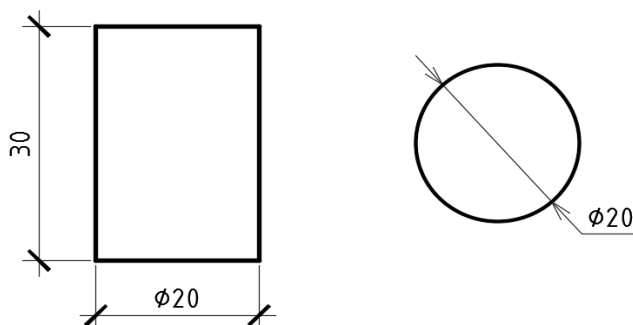


Рис. 5. Экспериментальный образец на сжатие

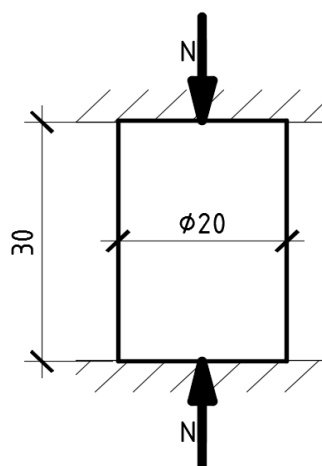


Рис. 6. Схема приложения нагрузки на сжимаемый образец

Таблица 2.

Обработка полученных результатов образца на сжатие

№ п/п	Разрушающая нагрузка N , кг	Площадь поперечного сечения образца: $A = \pi \cdot r^2$, см^2	Разрушающее напряжение: $\sigma_p = \frac{N}{A}$, МПа	Напряжение с учётом коэффициента запаса $k = 1,4$	Усреднённое значение напряжения: $\sigma = \frac{\sigma_p}{[K]}$, МПа
1	2200	3,14	70,06	50,04	47,01
2	2100		66,88	47,77	
3	1900		60,51	43,22	

При сжатии вдоль волокон разрушается от потери устойчивости отдельными наиболее прочными, а потому и наиболее нагруженными волокнами с изгибом их на небольшой длине в сторону более мягких соседних слоёв древесины.

На рисунке 7 представлена диаграмма работы древесины вдоль волокон при растяжении и сжатии, которая наглядно показывает, что древесина имеет разное сопротивление при растяжении-сжатии вдоль волокон.

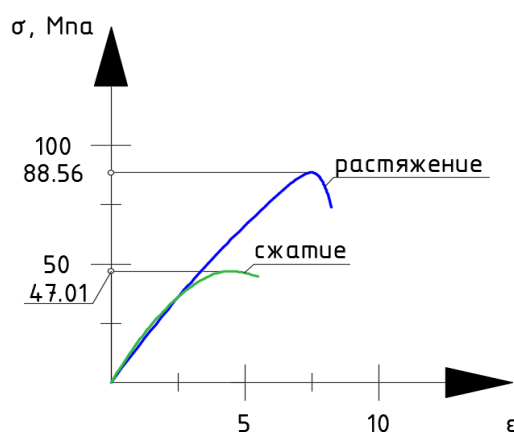


Рис. 7. Диаграмма работы древесины вдоль волокон

Заключение

Были произведены испытания опытных образцов на разрушающую нагрузку для установления пределов прочности опытного образца, для использования полученных данных в дальнейшем эксперименте и применения результатов исследования в расчётах. По результатам эксперимента методом неразрушающих воздействий было выяснено, что принятый для исследования материал при полученных данных эксперимента методом разрушающих воздействий и продолжительности эксперимента 8 минут не обладает ползучестью, но сильно проявляет свойство разномодульности при растяжении и сжатии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашкенazi Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесная промышленность, 1978. 223 с.
2. Гаппоев М. М. Конструкции из дерева и пластмасс / М. М. Гаппоев, И. М. Гуськов, Л. К. Ермоленко [и др.]. М.: Ассоциация строительных вузов. 2004. 440 с.

* * *

Odinokova Olga A., Doko Alexander A.
EXPERIMENTAL STUDY OF THE WORK OF WOOD

(Pacific national University, Khabarovsk;
ООО «MC PROJECT group», Khabarovsk)

Were testing prototypes from wood (pine second grade) on the breaking load for the mouth of the rehabilitation of the ultimate strength of the prototype and further use of the results in the strength calculations. The results of the experiment non-destructive effects, it was found that adopted for study material, if you obtained data of the experiment by the method of the damaging effects and the duration of the experiment is 8 minutes and has no creep. However, the studied samples were observed pronounced time-nomadology in tension and compression. The results of the experiment were explored properties of wood to optimize the calculations tov.

Keywords: wood properties, 2nd grade pine, destructive loads, wood stretching, wood compression, wood crushing, wood durability, calculation optimization, Heskraft laboratory machine, Um-5A laboratory machine.

REFERENCES

1. Ashkenazi E. K. *Anizotropiia drevesiny i drevesnykh materialov* (Anisotropy of wood and wood materials), Moscow, Lesnaia promyshlennost Publ., 1978. 223 p.
2. Gappoev M. M., Guskov I. M., Ermolenko L. K., Linkov V. I., Serova E. T., Stepanov B. A., Filimonov E. V. *Konstrukcii iz dereva i plastmass* (Structures made of wood and plastics), Moscow, Publisher ASV, 2004. 440 p.

* * *

УДК 621.316.1

И. Ю. Смирных, А. П. Афанасьев**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА RastrWin3
ПРИ РЕШЕНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАДАЧ
В СЕТЯХ 6—10 кВ**

В статье рассмотрена практическая эффективность применения программного комплекса RastrWin3 в области расчёта установившихся режимов электрических сетей 6—10 кВ с целью рассмотрения возможности оперирования линейными разъединителями для отключения уравнильных токов.

Ключевые слова: схема замещения электрической сети, элементы энергосистем сетей и их моделирование, метод Ньютона, «плоский старт», оперативные переключения, уравнильный ток.

Введение

Важнейшие практические задачи эксплуатации электроэнергетических систем, такие как оценка состояния, предельные и оптимальные режимы, анализ перспектив развития и планирование нагрузки, решаются расчётом установившихся режимов. Большую значимость имеют расчётные данные установившихся режимов электрических сетей всех классов напряжения. Активно развивается область автоматизированного расчёта режимов. В настоящее время разработан ряд программных комплексов именно для этих целей, одним из наиболее используемых инженерно-техническим персоналом является программный комплекс RastrWin3.

Распределительные сети 6—10 кВ, как правило, имеют разветвлённую структуру и, в основном, радиальные схемы. Для обеспечения взаиморезервирования между линиями осуществляется электрическая связь с коммутационным аппаратом (линейным разъединителем (ЛР) или, в некоторых случаях, выключателем). Как известно, линейным разъединителем допускается отключать уравнильный ток до 70 А при разнице напряжения в узлах не более 300 В, однако на практике, не имея данных

Смирных Игорь Юрьевич — магистрант 2 курса (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан).

Афанасьев Александр Петрович — кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой технических дисциплин (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: mr.preceptor@yandex.ru.

© Смирных И. Ю., Афанасьев А. П., 2017

расчёта режима, взаиморезервирование осуществляется с погашением потребителей и включением ЛР без нагрузки. Время оперативных переключений в зависимости от схемы и наличия оперативного персонала достигает иногда нескольких часов (для линий 6–10 кВ, источником питания которых являются подстанции, удалённые от центра и не имеющие постоянного дежурного персонала). Это отрицательно сказывается на показателях надёжности электроснабжения потребителей и приносит реальный ущерб электросетевым организациям в виде недоотпуска. Особенно остро стоит этот вопрос в период отопительного сезона и наличия среди потребителей социально значимых объектов.

Научно-техническая революция в области автоматизации расчётов в электроэнергетике на сегодняшний момент позволяет значительно упростить громоздкий и трудоёмкий расчёт режима не только в сетях высокого напряжения (35 кВ и выше), но и в распределительных сетях 6–10 кВ. Выполнить такой расчёт и проанализировать возможность оперирования ЛР под нагрузкой позволяет программный комплекс RastrWin3.

Расчёт параметров и моделирование исследуемого участка сети

Для выполнения исследований, связанных с расчётом режимов работы, был выбран один из участков сети 6 кВ в филиале «ДРСК» «Электрические сети ЕАО». Исходная схема исследуемого участка представлена на рисунке 1.

По исходной схеме строится схема замещения с нумерацией всех узлов и ветвей. Во вкладке «узлы» задаётся необходимая информация об узлах схемы (номер узла, номинальное напряжение $U_{ном}$, в узлах нагрузки — активная и реактивная мощность — P_n , Q_n). В качестве базисного (балансирующего) узла принимаются шины 6 кВ подстанции. На рисунке 2 представлена табличная форма для ввода параметров узлов исследуемого участка сети.

Во вкладке «ветви» задаются параметры линий (R , X) и трансформаторов (R , X , B , $K_{тр}$). Линейный разъединитель задаётся в программе выключателем без сопротивления. На рисунке 3 представлена табличная форма для ввода параметров ветвей исследуемого участка сети.

Вкладка «графика» используется для манипуляции данными включения и отключения элементов схемы. Для наглядности цветом выделены уровни напряжения, 6 кВ — синий, 0,4 кВ — зелёный. Расчёт установившегося режима выполняется итерационным методом Ньютона и начинается с так называемого «плоского старта» — номинальных модулей напряжений и нулевых углов для всех узлов рассматриваемой схемы (рис. 4).

Результаты моделирования и их анализ

Результаты эксперимента показали, что уравнильный ток составляет 44 А (данные токов в ветвях показаны красным цветом), т. е. не превышает допустимый предел, таким образом, оперирование ЛР под нагрузкой допустимо.

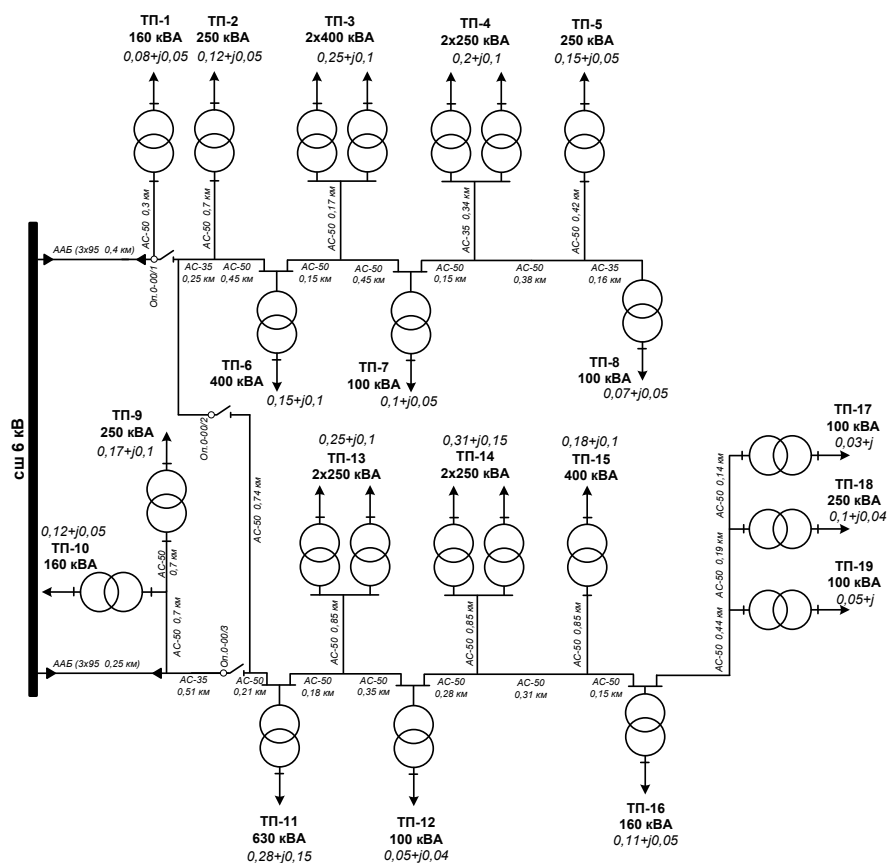


Рис. 1. Исходная схема распределительной сети 6 кВ

Файлы Расчеты Открыть Окна Помощь Стил

09:38:05 08

[Вид. Сеч.] [Вид. ВИР] [Вид. Ав.] МДП 1.0

Узлы

О	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г
		Нагр	225		0			0,12	0,05		
		Нагр	26		6						
		Нагр	226		0			0,09	0,05		
		Нагр	227		0			0,08	0,05		
		Нагр	27		6						
		Нагр	228		0			0,07			
		Нагр	229		0			0,06			
		Нагр	230		0			0,10	0,05		
		Нагр	28		6						
		Нагр	310		0			0,15	0,10		

выбрано 54 записи из 54

Конструктор фильтра...

Рис. 2. Форма для ввода параметров узлов

	O	S	Тип	N_нач	N_кон	N...	I...	Название	R	X	B	Kt/g
22	☐		ЛЭП	3	25		-		0,42	0,24		
23	☐		ЛЭП	5	26		-		0,10	0,05		
24	☐		ЛЭП	7	27		-		0,20	0,12		
25	☐		ЛЭП	8	28		-		0,25	0,15		
26	☐		ЛЭП	9	20		-		0,42	0,24		
27	☐		ЛЭП	20	29		-		0,40	0,20		
28	☐		ЛЭП	12	21		-		0,50	0,30		
29	☐		ЛЭП	14	22		-		0,27	0,16		
30	☐		ЛЭП	15	23		-		0,21	0,12		
31	☐		Тр-р	24	224		-		8,70	20,40	0,2	0,067
32	☐		Тр-р	25	225		-		6,70	15,60	0,2	0,067

выбрано 54 записи из 54

Конструктор фильтра...

Рис. 3. Форма для ввода параметров ветвей

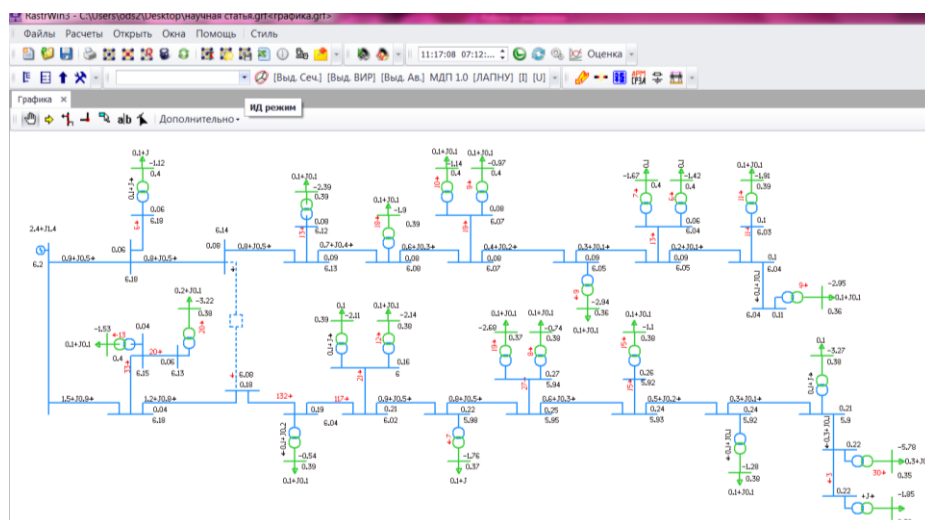


Рис. 4. Графическое представление результатов расчёта установившегося режима исследуемого участка сети в RasterWin

По данным электросетевой организации, время отключения потребителей рассматриваемого участка сети 6 кВ для производства переключений по взаиморезервированию в 2016 г. составило 6 час. 30 мин. с недоотпуском 52 600 тыс. кВт*час.

На основе анализа вышеприведённых данных можно сделать вывод о том, что использование в данном конкретном случае переключений ЛР 6 кВ под нагрузкой увеличит отпуск в сеть в среднем на 52 600 тыс. кВт*час в год.

Выявление большего количества участков сети 6–10 кВ, где можно применять данный подход, позволит не только улучшить показатели надёжности электроснабжения потребителей, но и существенно увеличить полезный отпуск электрической энергии потребителю.

Проведённое исследование показывает, что периодический мониторинг нагрузок в сети 0,4 кВ является действенным средством управления режимами функционирования контролируемого участка.

В связи с широким внедрением АСКУЭ на предприятиях филиала АО «ДРСК» «Электрические сети ЕАО» значительно упрощается сбор и анализ информации о параметрах функционирования сетевых объектов. Таким образом, использование модуля «Телеметрия» в пакете RastrWin позволит ещё более эффективно осуществлять функции управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варламов Е. В., Камочкина А. В., Обская О. В. Модели элементов энергосистем и сетей для расчёта установившихся режимов: учебное пособие. СПб.: ПЭИПК, 2012. 60 с.
2. Казакул А. А. Промышленные программно-вычислительные комплексы в электроэнергетике: методические указания к выполнению лабораторных работ. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2013. 92 с.
3. RastrWin: официальный сайт разработчиков ПО и сопутствующих программных продуктов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rastrin.ru>

* * *

Smirnych Igor Y., Afanasyev Alexander P.
PRACTICAL APPLICATION OF THE SOFTWARE COMPLEX RastrWin3
FOR SOLVING PROBLEMS IN NETWORKS OF 6—10 kV
 (Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan)

The practical efficiency of the application of the RastrWin3 software complex in the calculation of steady — state modes of 6—10 kV electric networks is considered in the article, in the circuits of consideration of the possibility of operating with linear disconnectors, for disabling equalizing currents.

Keywords: Scheme of substitution of the electric network, elements of grid power systems and their modeling, Newtons methods «flat start», operational switching, equalizing current.

REFERENCES

1. Varlamov E. V., Kamochkina A. V., Obskaia O. V. *Modeli elementov energosistem i setei dlia rascheta ustanovivshikhsia rezhimov* (Models of the elements of power systems and networks for the calculation of steady-state regimes: a manual), St. Petersburg, 2012. 60 p.
2. Kazakul A. A. *Promyshlennye programmno-vychislitelnye komplekсы v elektroenergetike: metodicheskie ukazaniia k vypolneniiu laboratornykh rabot* (Industrial software and com-

puter complexes in the electric power industry: methodical instructions for the performance of laboratory works), Blagoveshchensk, 2013. 92 p.

3. *RastrWin: ofitcialnyi sait razrabotchikov PO i sopushtvuiushchikh programmnykh produktov* (RastrWin: official site of software developers and related software products) Available at: <http://www.rastrin.ru>

* * *

УДК 621.311.4:621.33

В. А. Шлыков, А. П. Афанасьев**ПРОБЛЕМА ВЫБОРА ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО РЕЖИМА
ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ В СЕТЯХ
С НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 кВ**

В статье рассмотрен критерий определения способа заземления нейтрали в сетях свыше 1 кВ. Выполнен анализ результатов моделирования работы заземляющего устройства в пакете Simulink.

Ключевые слова: трёхфазная нагрузка, однофазное замыкание на землю, нейтраль, воздушная линия электропередач, заземление.

Введение

Для промышленного электроснабжения в настоящее время в России повсеместно используется система трёхфазного переменного тока с частотой 50 Гц при различных напряжениях: от 750 кВ при передаче электроэнергии на большие расстояния до 0,4 кВ у потребителей электрической энергии.

Способ заземления нейтрали является фактором, который влияет на надёжность функционирования сетей и определяет их рабочую устойчивость при перенапряжениях, возникающих в случаях дуговых замыканиях на землю [1, 2].

При прочих равных условиях предпочтение должно быть отдано такому способу заземления нейтрали, при котором защита от замыкания на землю получается достаточно простой и надёжной.

На рисунке 1 представлена общепринятая классификация критериев, по которым определяется способ заземления нейтрали в зависимости от напряжения на неповреждённых фазах.

Как видно из приведённого изображения, если значения напряжений на неповреждённых фазах лежат в диапазоне области I, то рекомендуется режим заземления с эффективным заземлением нейтрали. Для значений напряжений, лежащих в диапазоне области II, необходима компенсация ёмкостного тока замыкания [3]. Самый распространённый

Шлыков Виктор Александрович — магистрант 2 курса (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан).

Афанасьев Александр Петрович — кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой технических дисциплин (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: mr.preceptor@yandex.ru.

© Шлыков В. А., Афанасьев А. П., 2017

случай относится к области III — область применения сетей с изолированной нейтралью. Область IV соответствует области неиспользуемых режимов.

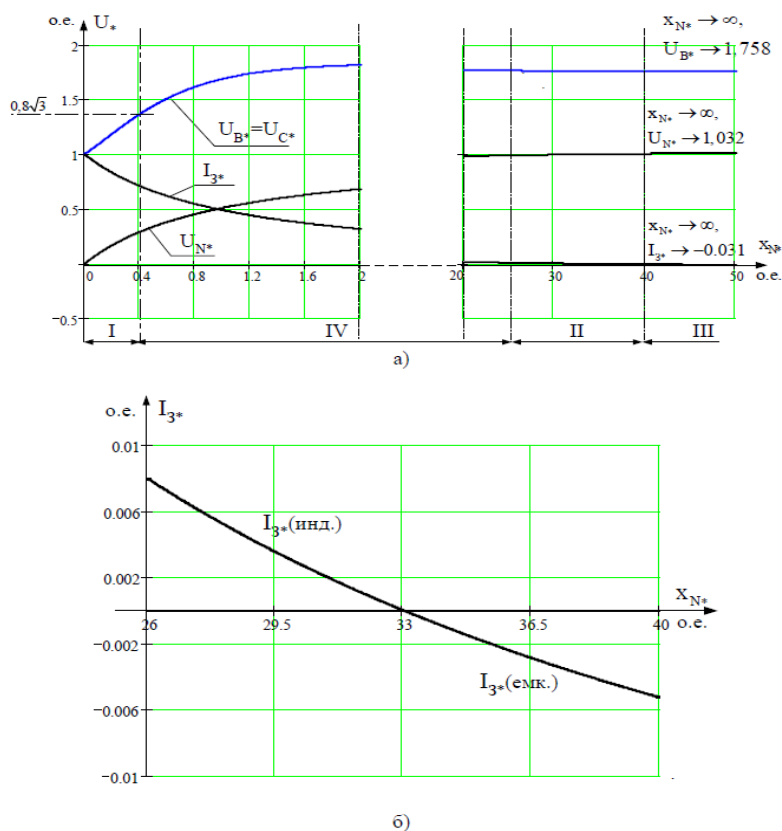


Рис. 1. Напряжения на неповреждённых фазах, $\dot{U}_{B^*} = \dot{U}_{C^*}$, нейтрали $\dot{U}_{N^*}$ и ток короткого замыкания при однофазном замыкании на землю

Для изучения процессов, протекающих в электрических сетях при однофазных замыканиях на землю, и определения влияния способа заземления на параметры этих процессов авторами был поставлен имитационный эксперимент.

Моделирование работы заземляющего устройства в пакете Simulink

Целью моделирования является исследование электромагнитных переходных процессов в сельских электрических сетях при различном конструктивном исполнении линии электропередачи и заземлении нейтрали.

В качестве объекта исследования рассматривался участок сельской распределительной сети 10 кВ, получающей питание от подстанции

электрических сетей. На подстанции установлены два трансформатора типа ТМН-6300/35/10 со схемой соединения обмоток У/А. Общая протяжённость отходящих от шин подстанции воздушных линий напряжением 10 кВ составляет 72 км. Подстанция получает питание по двум воздушным линиям напряжением 35 кВ. Моделировались процессы коммутации и однофазное замыкание в линии 10 кВ с односторонним питанием протяжённостью 15 км. В нормальном режиме нагрузка сети составляет $S = 1500 + j500$ кВА. Схема модели сети представлена на рисунке 2.

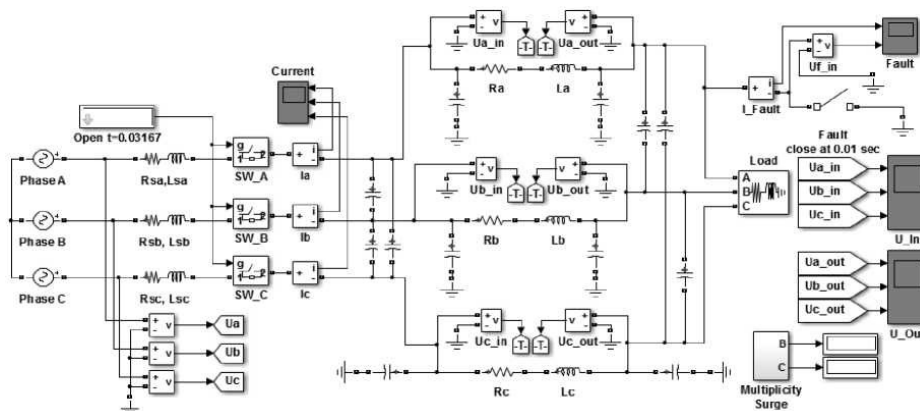


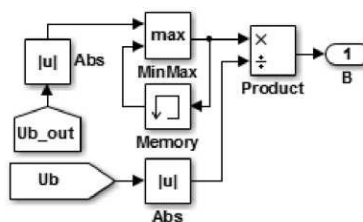
Рис. 2. Имитационная модель сети 10 кВ

Модель состоит из трёх источников синусоидального напряжения AC Voltage Source; воздушной линии электропередачи, которая моделировалась по П-образной схеме замещения линии с сосредоточенными параметрами блоками Series RLC Branch с учётом ёмкостей фаза-земля; ключей Ideal Switch, с помощью которых моделировалось отключение трёх фаз. Блок Breaker моделирует металлическое замыкание фазы «А» на землю, измерительные блоки Current Measurement и Voltage Measurement предназначены для измерения тока и напряжения соответственно, с помощью осциллографа Scope фиксируются значения параметров в переходном режиме сети [4]. Блок пользователя Powergui определяет модуль и фазу напряжения и тока в установившемся режиме [5] (начальные значения интегрируемых переменных).

В стандартном наборе элементов библиотеки Simulink нет блока для определения кратности перенапряжений, поэтому с помощью стандартных элементов Simulink был собран блок Multiplicity Surge на базе Simulink-элементов, схема блока представлена на рисунок 3.

В данной схеме:

– блок Minmax предназначен для выбора максимального (минимального) значения из массива сигналов, поступающих на его вход;

Рис. 3. Схема блока *Multiplicity Surge*

– блок *Memory* выполняет задержку входного сигнала на один временной такт (шаг интегрирования), служит накопителем максимального мгновенного значения напряжения;

– блок *Abs* выполняет вычисление абсолютного значения величины сигнала; блок *Product* осуществляет вычисление текущих значений сигналов.

Результаты имитационного эксперимента

При проведении серии вычислительных экспериментов на имитационной модели изменялись параметры схемы замещения линии электропередачи в соответствии с каталожными данными проводов для голых и защищённых изоляцией проводов.

Во всех экспериментах использованы провода с площадью поперечного сечения 70 мм².

Работа имитационной модели сети осуществляется следующим образом:

1. В начальный момент времени ($t_0 = 0$) схема работает в нормальном режиме;
2. В момент времени $t_i = 1/4T$ (где T – период промышленной частоты) происходит однофазное замыкание фазы А на землю через блок *Breaker*.
3. Во втором периоде колебаний, когда амплитуда фазы В достигает максимального значения, происходит отключение трёх фаз нагруженной линии от источника питания.

В процессе эксплуатации ёмкость сети может изменяться в широких пределах за счёт изменения количества подключённых к шинам подстанции фидеров, а также реконструкции сети, эксперименты проведены для эквивалентной ёмкости сети, выполненной голыми и защищёнными изоляцией проводами, соответствующей длине линии 72 км.

В сети с компенсированной нейтралью эксперименты проведены для случая расстройки компенсации 10 %. Для нейтрали, заземлённой через резистор, сопротивление высокоомного резистора принято 1 кОм, а низкоомного – 0,1 кОм.

Для примера на рисунках 4 и 5 приведены осциллограммы изменения напряжения фаз в момент возникновения однофазного замыкания

и последующего отключения трёх фаз от источника питания для нагруженной линии на начальном и конечном участках ЛЭП соответственно.

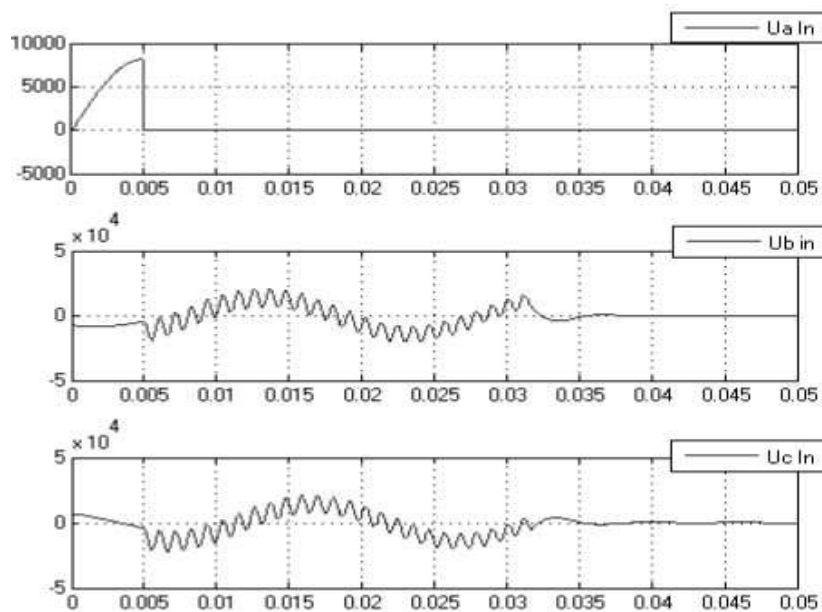


Рис. 4. Осциллограммы напряжений на начальном участке ЛЭП

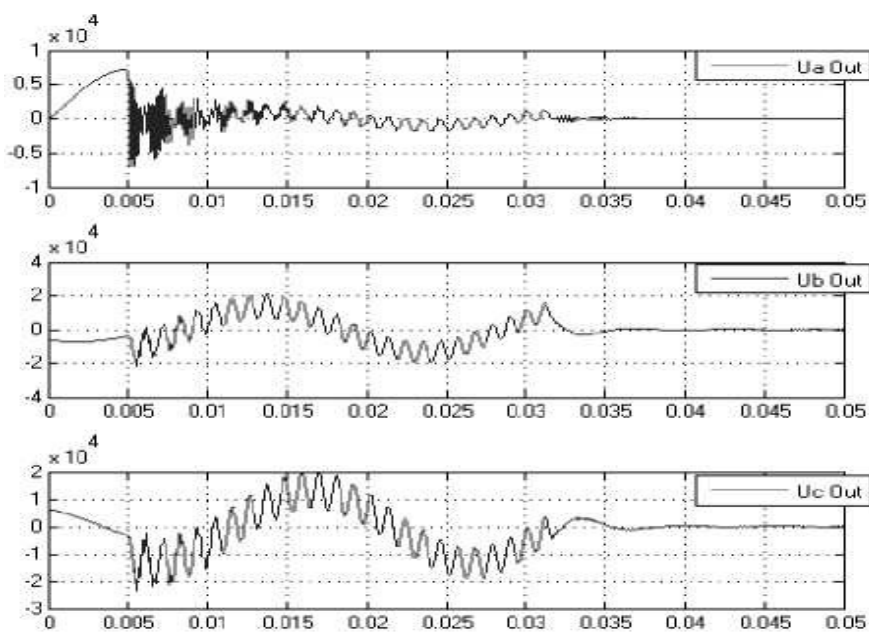


Рис. 5. Осциллограммы напряжений на конечном участке ЛЭП

Как показали результаты имитационного эксперимента, токи однофазного замыкания в сети 10 кВ с изолированной нейтралью, выполненной защищёнными изоляцией проводами, превышают токи в сети с проводами АС в 2,2 раза (при проводах SAX-W-70) и в 17,4 раза (при проводах SAXKA-70). Это обстоятельство приводит к необходимости применять средства ограничения тока замыкания или исключать возможность работы сети с замкнутой на землю фазой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. М.: Госэнергоиздат, 2001. 415 с.
2. Сирота И. М., Кисленко С. Н., Михайлов А. М. Режимы нейтрали электрических систем. Киев: Изд-во АН СССР, 2003. 264 с.
3. Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией ёмкостных токов. М.: Энергия, 2001. 152 с.
4. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в энергетических системах. М.: Наука, 1970. 510 с.
5. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. 288 с.

* * *

Shlykov Alexey A., Afanasyev Alexander P.
THE PROBLEM OF CHOOSING AN APPROPRIATE NEUTRAL GROUNDING MODE
IN NETWORKS WITH VOLTAGES ABOVE 1 KV

(Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan)

The criterion for determining the method of neutral grounding in networks over 1 kV is considered in the article. An analysis of the results of simulating the operation of the grounding device in the Simulink package is performed.

Keywords: Three-phase load, Single-phase earth fault, Neutral, Overhead power line, Grounding.

REFERENCES

1. Vilgeim R., Uoters M. *Zazemlenie neutrali v vysokovoltnykh sistemakh* (Neutral grounding in high-voltage systems), Moscow, Gosenergoizdat Publ., 2001. 415 p.
2. Sirota I. M., Kislenko S. N., Mikhailov A. M. *Rezhimy neutrali elektricheskikh system* (Neutral modes of electrical systems), Kiev, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 2003. 264 p.
3. Likhachev F. A. *Zamykaniia na zemliu v setiakh s izolirovannoi neutraliu i s kompensatsiei emkostnykh tokov* (Ground faults in networks with isolated neutral and with compensation of capacitive currents), Moscow, Energia Publ., 2001. 152 p.
4. Ulianov S. A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v energeticheskikh sistemakh* (Electromagnetic transients in power systems), Moscow, Nauka Publ., 1970. 510 p.
5. Chernykh I. V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* (Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink), Moscow, St. Petersburg, 2008. 288 p.

* * *

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.316.925.2

А. П. Афанасьев, К. А. Соболенко

ИМИТАЦИОННАЯ SIMULINK МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РЕЛЕ

В статье рассмотрено моделирование цифрового дифференциального реле, предназначенного для защиты силового трансформатора. Проанализированы результаты тестирования работы имитационной модели реле в пакете Simulink.

Ключевые слова: модель цифрового дифференциального реле, силовой трансформатор, внутреннее и внешнее короткое замыкание, нагрузка, схема логического блока, решения контроллера реле.

Введение

В настоящее время для защиты электросилового оборудования внедряются цифровые логические устройства — цифровые реле.

В связи с этим возникает необходимость отработки и настройки логических программных алгоритмов, с помощью которых принимаются решения по обесточиванию тех или иных компонентов электропитания.

В таблице 1 приведено сравнение различий между традиционным и цифровым реле.

Если возникает короткое замыкание в защитной зоне силового трансформатора, ток короткого замыкания должен быть: $I_f = I'_1 + I'_2$, на который должно срабатывать дифференциальное реле (рис. 1). Если есть внешнее замыкание или нагрузка, ток, входящий в защитную зону, должен быть равен нулю, и, соответственно, дифференциальное реле в этом случае не срабатывает: $I_f = I'_1 - I'_2$.

Афанасьев Александр Петрович — кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой технических дисциплин (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: mr.preceptor@yandex.ru.

Соболенко Кирилл Алексеевич — магистрант 2 курса (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан).

© Афанасьев А. П., Соболенко К. А., 2017

Таблица 1

Основные характеристики традиционного и цифрового реле

Традиционное реле	Цифровое реле
Гальванически соединённые цепи должны иметь только одну общую точку.	Цепи трансформаторов тока цифровых реле разделены и должны быть заземлены.
Дифференциальную разность трансформаторов тока нужно подогнать с помощью вспомогательного трансформатора тока.	Цифровые реле имеют встроенную подгонку.
Комплексы адаптированы путём использования подходящего трансформатора тока.	В цифровых реле учёт комплексов встроен.
Компоненты нулевой последовательности исключены подходящим выбором трансформатора тока.	В цифровых реле данная возможность встроена.

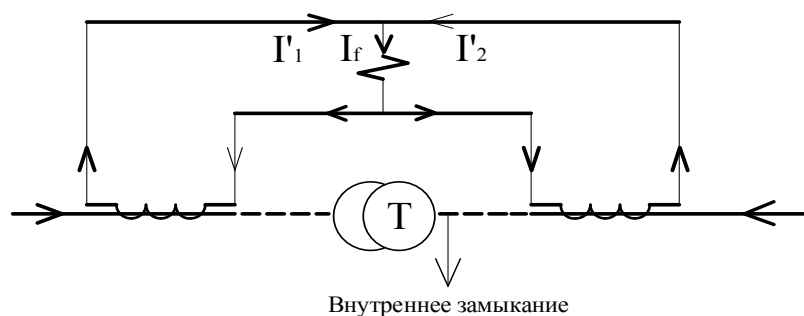


Рис. 1. Условие внутреннего замыкания

Однако благодаря наличию ошибок в трансформаторах тока точное измерение разности токов невозможно, и действующее значение $I_f = I'_1 - I'_2$ является конечным при внешних замыканиях (рис. 2) или условиях нагрузки, что приводит к возможности ложных срабатываний дифференциального реле.

Для обеспечения стабильности необходима поправка $I_{res} = (I'_1 + I'_2) / 2$.

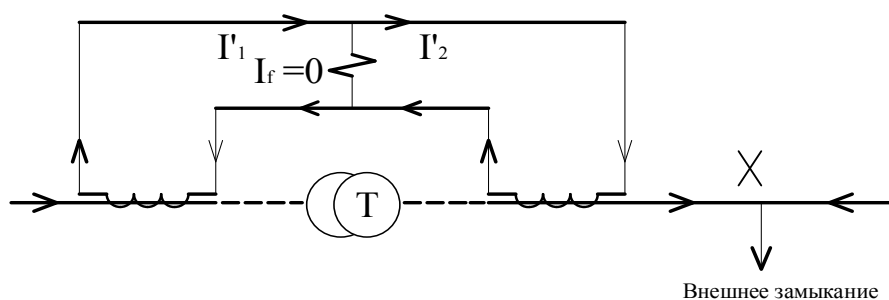


Рис. 2. Условие внешнего замыкания

С учётом поправки $I_{res} = (I'_1 + I'_2) / 2$ строится наклонная оперативная характеристика, которую обычно используют для стабильности при внешнем коротком замыкании данного типа реле. График этой характеристики в относительных единицах представлен на рисунке 3.

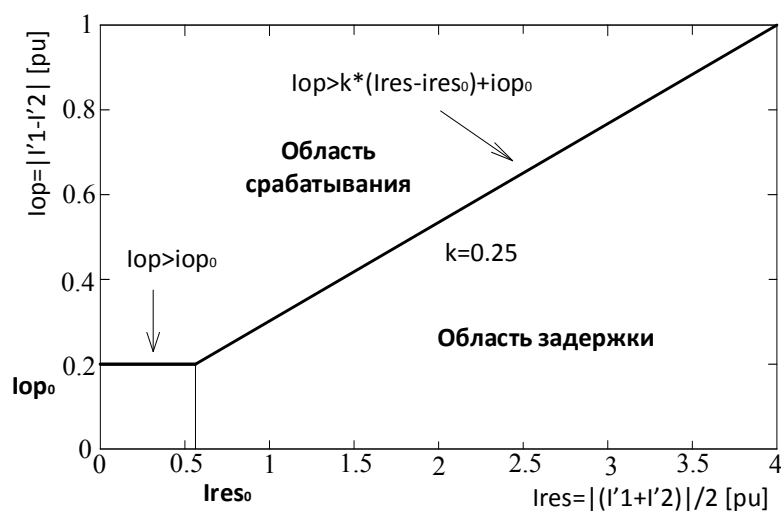


Рис. 3. График наклонной характеристики с критериями операционного действия для двухобмоточного трансформатора

Здесь: I_{op} — ток срабатывания, I_{res} — ток задержки, I_{op0} — основной дифференциальный ток защиты, I_{res0} — значение текущего порогового тока.

Модель цифрового дифференциального реле в пакете Simulink

Для проверки работы цифрового реле с приведённой выше наклонной характеристикой была разработана имитационная модель, которая изображена на рисунке 4. Параметры трансформатора были выбраны следующие: номинальное напряжение — 750/500 кВ; номинальная мощность — 250 МВт, частота сети — 50 Гц; нагрузка — $(200+25j)$ МВА.

Модель состоит из трёхфазного источника Three-Phase Source; двух блоков выключателей Three-Phase Breaker, которые моделируют включение и выключение переменного тока на трёх фазах; трёхфазного двухобмоточного трансформатора Three-Phase Transformer (Two Windings); двух измерительных блоков Three-Phase V-I Measurement для измерения токов и напряжений; блока трёхфазной последовательной нагрузки Three-Phase Series RLC Load; трёх блоков короткозамыкателей Three-Phase Fault, моделирующих замыкание фаз между собой, а также на землю; логического блока.

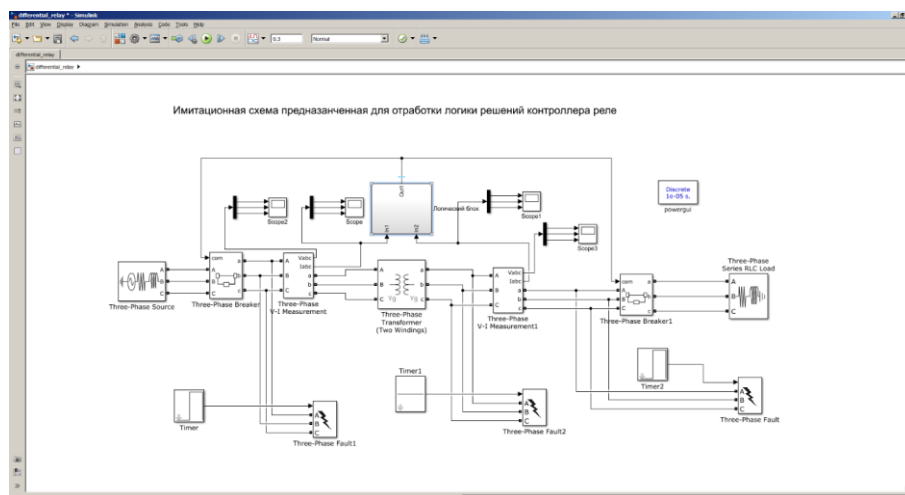


Рис. 4. Имитационная модель, предназначенная для обработки логики решений контроллера реле

В осциллографах Scope и Scope 2 фиксируются значения, соответственно, тока и напряжения до трансформатора, а в осциллографах Scope 1 и Scope 3 — после трансформатора. Блок пользователя *Powergui* определяет модуль и фазу напряжения и тока в установившемся режиме (начальные значения интегрируемых переменных).

На рисунке 5 показана схема логического блока.

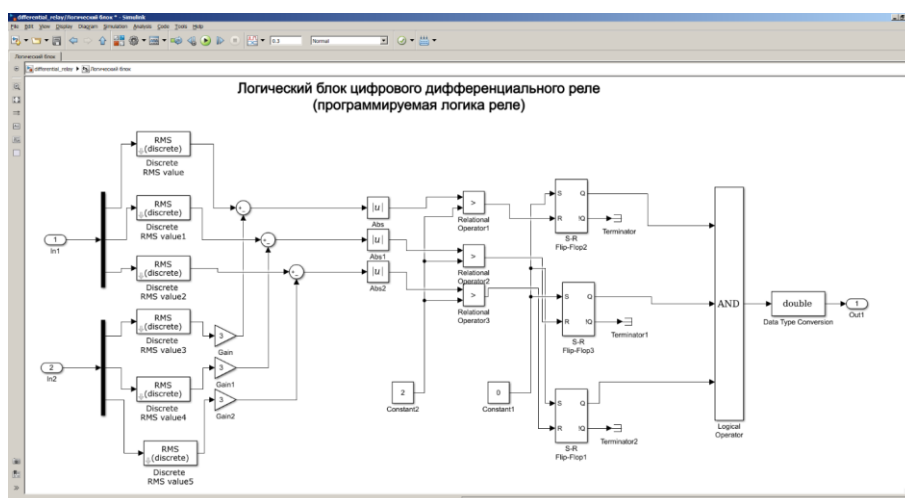


Рис. 5. Схема логического блока цифрового дифференциального реле

Результаты имитационного эксперимента

Рисунок 6 иллюстрирует осциллограмму фазовых токов первичной обмотки силового трансформатора.

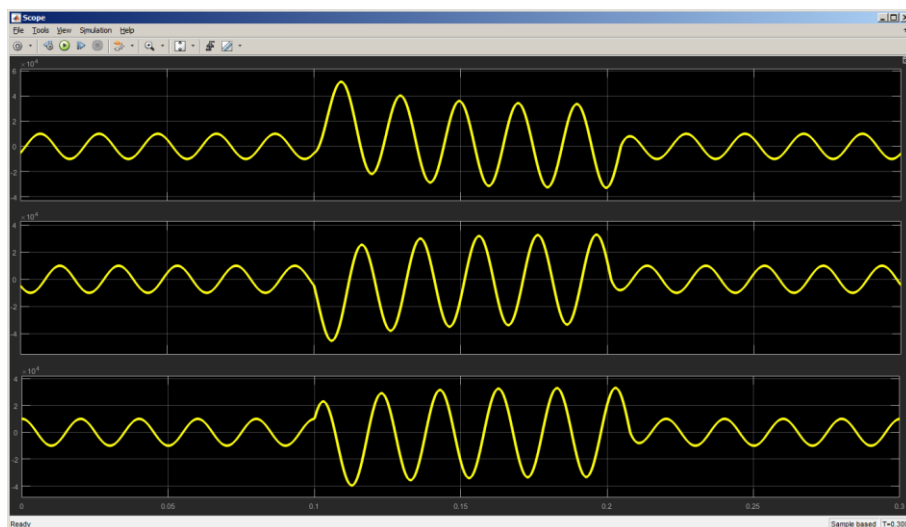


Рис. 6. Осциллограмма фазовых токов первичной обмотки трансформатора

Результаты эксперимента показали, что модель цифрового дифференциального реле имеет высокую чувствительность при внутренних замыканиях и высокую стабильность при внешних замыканиях, а также высокую эффективность алгоритма принятия решений контроллера реле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bouderbala R., Bentarzi H., Abderrahmane O. A New Approach Applied to Digital Differential Protection for a Large Power Transformer // The 9th WSEAS international conference on Recent Researches in Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing Proceeding, Athena, Greece, Dec. 29 – 31, 2010. Pp. 202 – 205.
2. SimPowerSystems For Use With SimuLink, User's Guide. The Math Works Inc., 2011. 837 p.
3. Ziegler G. Transformer Protection. SIEMENS publications, 2008. 374 p.

* * *

Afanasyev Alexander P., Sobovenko Kirill A.
SIMULATION SIMULINK MODEL OF DIGITAL DIFFERENTIAL RELAY
 (Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan)

The simulation of a digital differential relay designed to protect a power transformer is considered in the article. The results of testing the simulation model of the relay in the Simulink package are analyzed.

Keywords: Digital differential relay model, power transformer, internal and external short circuit, load, logic block diagram, relay controller solutions.

REFERENCES

1. Bouderbala R., Bentarzi H., Abderrahmane O. A New Approach Applied to Digital Differential Protection for a Large Power Transformer, *The 9th WSEAS international conference on Recent Researches in Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing Proceeding*, Athena, Greece, Dec. 29 – 31, 2010, pp. 202–205.
2. SimPowerSystems For Use With SimuLink, User's Guide. The Math Works Inc., 2011. 837 p.
3. Ziegler G. *Transformer Protection*, SIEMENS publ., 2008. 374 p.

* * *

УДК: 532.135

С. В. Лапшина, В. М. Шаповалов**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТЕЧЕНИИ
НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ**

Поставлена и решена задача о вытеснении жидкости Оствальда-де Вилия жидкостью с отличной температурой в круглой трубе. Получено аналитическое решение задач для случаев подачи на вход системы ступенчатого и импульсного возмущений. Представлены результаты расчёта кривой отклика. В случае дилатантной жидкости на кривой отклика отсутствует излом.

Ключевые слова: расход, температура, модель Оствальда-де Вилия, время, скорость.

Большинство химико-технологических процессов проводится в потоке жидкости или газа. Характеристики потока оказывают чрезвычайно существенное влияние на ход процессов, и построить хорошую модель процесса без учёта этого обстоятельства невозможно.

В химической технологии наиболее распространены аппараты непрерывного действия. Существование поля скоростей обуславливает неравномерность времени пребывания частиц жидкости в аппарате: в частицах с малым временем пребывания реакция пройдёт недостаточно глубоко, зато в частицах, долго находящихся в рабочей зоне, глубина протекания реакции велика.

Рассматривается трубчатый реактор, работающий в режиме вытеснения. Близкая по смыслу проблема переработки неньютоновских сред в трубчатых реакторах рассмотрена профессором А. Б. Голованчиковым в серии работ [1–3], [5].

Следует отметить: имеем задачу вытеснения одной и той же жидкости, но различающуюся температурой. Можно эту задачу распространить на вытеснение жидкости с одной концентрацией растворённого компонента той же жидкостью, но отличающейся концентрацией. При этом формулировка задачи сохраняется, требуется лишь во всех выражениях вместо температуры поставить концентрацию. В теории фильт-

Лапшина Светлана Владимировна — кандидат технических наук, доцент (Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Волжский); e-mail: svm-5@mail.ru.

Шаповалов Владимир Михайлович — доктор технических наук, профессор (Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Волжский); e-mail: svm-5@mail.ru.

© Лапшина С. В., Шаповалов В. М., 2017

рации подобная задача называется «задачей о разноцветных жидкостях». Также можно рассматривать трубу как трубчатый реактор, в котором протекает какая-либо химическая реакция без изменения физических свойств жидкости. Следовательно, рассматриваемая задача имеет достаточно широкое приложение.

Поперечное сечение рассматриваемого участка трубы радиусом R представлено на рисунке 1. Рассмотрим участок трубы длиной, равной или несколько превышающей ℓ . Поступающая в трубопровод жидкость имеет постоянную температуру T_0 . Температура жидкости на участке $0 < z < \ell$ однородна по сечению и в начальный момент равна T_1 ($T_1 \neq T_0$). Теплообмен со стенками трубы не учитываем. Поперечную и продольную теплопроводность также не учитываем. Задача состоит в определении изменения средней по сечению температуры жидкости на выходе, т. е. в контрольном сечении, удалённом от входа на расстояние $z = \ell$.

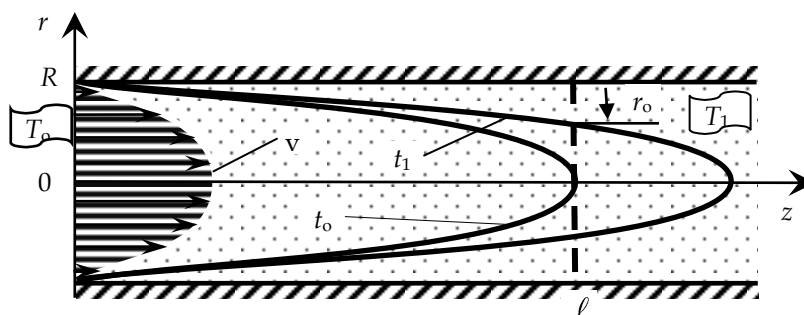


Рис. 1. Расчётная схема течения

Пусть реологические свойства жидкости описываются уравнением состояния Оствальда-де Виля [4]:

$$\tau_{rz} = \eta_0 \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^n,$$

где τ_{rz} — касательное напряжение, η_0 — консистентность, n — индекс течения, v — осевая скорость, r — радиус.

Стационарное ламинарное (слоистое) течение степенной жидкости характеризуется следующим поперечным профилем скорости [5]:

$$v = v_0 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right], \quad (1)$$

где v_0 — скорость на оси. Для течения ньютоновской жидкости ($n = 1$) характерно соотношение $v_0 = 2v_+$ ($v_+ = V/(\pi R^2)$ — среднерасходная скорость жидкости, $V = \text{const}$ — объёмный расход).

Согласно (1), максимальную скорость осевого перемещения имеют частицы жидкости на оси трубы (v_o). У стенки (условие прилипания) скорость равна нулю.

Очевидно, что время достижения частицей жидкости, находящейся на оси, выходного (контрольного) сечения $z = \ell$ составляет $t_o = \ell / v_o$. При этом средняя по сечению $z = \ell$ температура равна T_1 . Для этого момента времени можно записать:

$$t \leq t_o, \quad T = T_1. \quad (2)$$

Далее для всех времён ($t > t_o$) в сечении $z = \ell$ происходит рост средней по сечению температуры. Учитывая формулу (1), можем записать уравнение, связывающее радиус сечения параболоида жидкости с температурой T_o , плоскостью $z = \ell$ с временем (рис. 1):

$$t = \ell \left\{ v_o \left[1 - \left(\frac{r_o}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \right\}^{-1}. \quad (3)$$

Здесь r_o — радиус границы раздела жидкостей, имеющих различную температуру, в сечении $z = \ell$. Из соотношения (3) следует:

$$\left(\frac{r_o}{R} \right)^2 = \left(1 - \frac{\ell}{v_o t} \right)^{\frac{2n}{n+1}}. \quad (4)$$

Найдём среднюю температуру в контрольном сечении для произвольного времени t ($t > t_o$). Жидкость несжимаемая, теплофизические свойства постоянны и не зависят от температуры. Условно сечение можно разбить на ядро радиусом $r_o(t)$ с температурой жидкости T_o и кольцевое сечение ($r_o(t) < r < R$) с температурой T_1 .

Теплосодержание ядра:

$$Q_o = C \rho T_o 2\pi \int_0^{r_o} v r dr. \quad (5)$$

Теплосодержание кольцевого сечения:

$$Q_1 = C \rho T_1 2\pi \int_{r_o}^R v r dr. \quad (6)$$

Допустим, жидкость в контрольном сечении интенсивно перемешивается, тогда её теплосодержание соответствует средней температуре:

$$Q_+ = C \rho T_+ 2\pi \int_0^R v r dr, \quad (7)$$

где C, ρ — теплоёмкость и плотность жидкости соответственно.

Уравнение теплового баланса в контрольном сечении:

$$Q_+ = Q_0 + Q_1. \quad (8)$$

Подставив составляющие (5) – (7) в уравнение (8), получим выражение для средней по сечению температуры жидкости в контрольном сечении:

$$T_+ = T_1 + (T_0 - T_1) \frac{2(3n+1)}{(n+1)} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{r_0(t)}{R} \right)^2 - \frac{n}{(3n+1)} \left(\frac{r_0(t)}{R} \right)^{\frac{3n+1}{n}} \right]. \quad (9)$$

С учётом соотношения (4) выражение (9) примет вид:

$$T_+ = T_1 + (T_0 - T_1) \frac{2(3n+1)}{(n+1)} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\ell}{v_0 t} \right)^{\frac{2n}{n+1}} - \frac{n}{(3n+1)} \left(1 - \frac{\ell}{v_0 t} \right)^{\frac{3n+1}{n+1}} \right], \quad t > t_0. \quad (10)$$

Согласно полученному выражению, средняя температура на выходе трубы изменяется по гиперболическому закону и при бесконечно большом времени стремится к температуре на входе ($t \rightarrow \infty$, $T_+ \rightarrow T_0$).

Введём безразмерные переменные:

$$\theta = \frac{T_+ - T_1}{T_0 - T_1}, \quad \tau = \frac{t}{t_0}. \quad (11)$$

С учётом обозначений (11) решение задачи (2) (10) примет более компактный вид:

$$\theta = \begin{cases} 0, & \text{если } \tau \leq 1 \\ \frac{2(3n+1)}{(n+1)} \left(1 - \frac{1}{\tau} \right)^{\frac{2n}{n+1}} \left[\frac{1}{2} - \frac{n}{(3n+1)} \left(1 - \frac{1}{\tau} \right) \right] & \text{если } \tau > 1. \end{cases} \quad (12)$$

Вид решения (12) не зависит от соотношения температур T_0 и T_1 . Как было отмечено выше, вместо температур в первой формуле в (11) могут использоваться концентрации.

График функции $\theta(\tau)$ показан на рисунке 2. Представлена так называемая кривая разгона — реакция системы на ступенчатое возмущение входного параметра. Имеем типичный объект с запаздыванием. Зависимость носит асимптотический характер. Вид разгонной кривой однозначно определяется профилем скорости. При ламинарном течении жидкости Оствальда-де Виля профиль скорости полностью определяется индексом течения, поэтому кривая разгона коррелирует со степенью аномалии вязкости. В случае ярко выраженных псевдопластических свойств жидкости ($n < 1$) режим течения приближается к поршневому.

Рассмотрим более сложный вариант задачи: реакцию системы на импульсное возмущение.

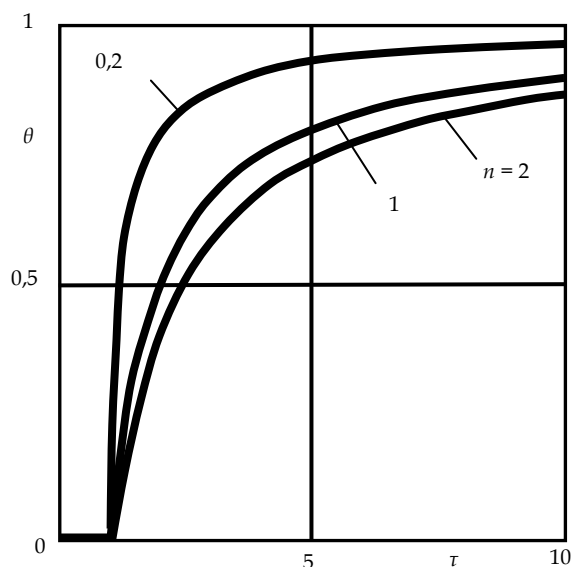


Рис. 2. Изменение средней безразмерной температуры в контрольном сечении

В этом случае кривую отклика получают при подаче на вход конечного количества индикатора, например, жидкости отличной температуры. Следует отметить, что в качестве возмущения могут быть использованы: концентрация, оптическая плотность, радиоактивное излучение.

Расчётная схема с тремя вариантами ситуации представлена на рисунке 3. Имеем установившийся поток жидкости в трубопроводе температурой T_1 . В момент времени $t = 0$ в окрестности начала координат возникает цилиндрический объём жидкости $\pi R^2 \delta$ с температурой T_0 . Технически это можно реализовать, например, путём нагрева жидкости электрическим током. С течением времени цилиндрический объём индикатора трансформируется в параболоид вращения, причём на любом радиусе толщина слоя индикатора в направлении z постоянна и составляет δ (теплопроводность жидкости не учитывается).

Условно движение индикатора можно разбить на 3 периода. Первый период (рис. 3а) начинается в нулевой момент времени и заканчивается в момент $t = t_0$, когда вершина переднего фронта индикатора касается контрольного сечения $z = \ell$. В течение первого периода температура на выходе постоянна $T = T_1$. Для первого периода можем записать:

$$0 < t < t_0, \quad T = T_1. \quad (13)$$

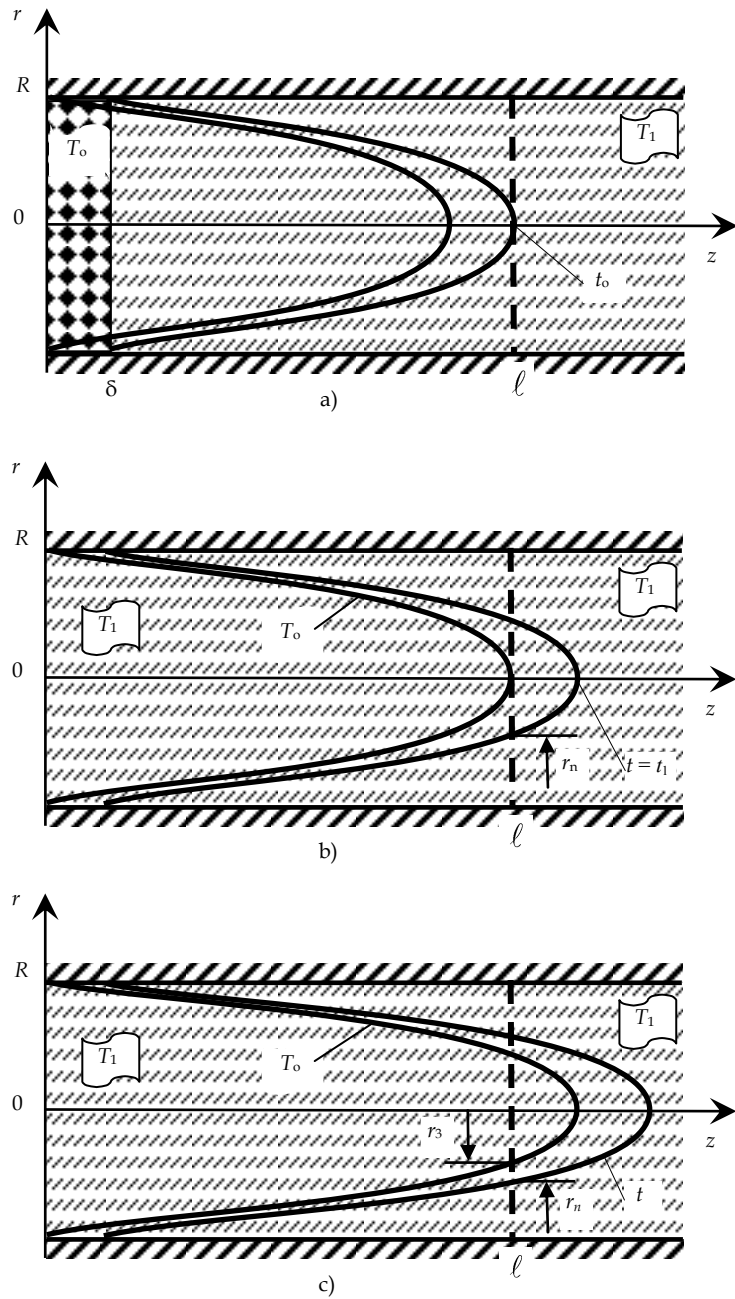


Рис. 3. Три стадии движения фронта индикатора

Продолжительность первого периода можно найти по тривиальной формуле механики $t_0 = (\ell - \delta)/v_0$.

Второму периоду отвечает интервал времени $t_0 < t < t_1$. В момент $t = t_1$ экстремум заднего фронта индикатора касается контрольного сечения в точке $r = 0, z = \ell$.

Граничное значение времени t_1 можно найти по формуле $t_1 = \ell / v_0$. При этом средняя температура на выходе увеличивается и достигает наибольшего значения, поскольку увеличивается радиус r_n .

Учитывая эпюру скорости (1), для второго периода можем записать уравнение кинетики роста радиуса сечения переднего фронта $r_n(t)$ в сечении $z = \ell$:

$$t = (\ell - \delta) \left\{ v_0 \left[1 - \left(\frac{r_n}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \right\}^{-1}, \quad t > t_0. \quad (14)$$

Соответственно, в третьем периоде кинетика роста сечения заднего фронта параболоида индикатора $r_3(t)$ описывается уравнением

$$t = \ell \left\{ v_0 \left[1 - \left(\frac{r_3}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \right\}^{-1}, \quad t > t_1. \quad (15)$$

Согласно выражению (14), для интервала времени второго периода ($t_1 > t > t_0$) можем записать соотношение:

$$\left(\frac{r_n}{R} \right)^2 = \left(1 - \frac{\ell - \delta}{v_0 t} \right)^{\frac{2n}{n+1}}, \quad t > t_0. \quad (16)$$

Среднюю температуру в контрольном сечении найдём из уравнения теплового баланса (8), в котором следует положить:

$$Q_0 = C \rho T_0 2\pi \int_0^{r_n} v r dr, \quad Q_1 = C \rho T_1 2\pi \int_{r_n}^R v r dr, \quad Q_+ = C \rho T_+ 2\pi \int_0^R v r dr.$$

Выполнив интегрирование, получим выражение для средней температуры в контрольном сечении во втором периоде:

$$T_+ = T_1 + (T_0 - T_1) \frac{2(3n+1)}{(n+1)} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{r_n(t)}{R} \right)^2 - \frac{n}{3n+1} \left(\frac{r_n(t)}{R} \right)^{3+\frac{1}{n}} \right].$$

С учётом соотношения (16) последнее выражение примет вид:

$$T_+ = T_1 + (T_0 - T_1) \frac{2(3n+1)}{(n+1)} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\ell - \delta}{v_0 t} \right)^{\frac{2n}{n+1}} - \frac{n}{3n+1} \left(1 - \frac{\ell - \delta}{v_0 t} \right)^{\frac{(3n+1)}{(n+1)}} \right], \quad t_0 < t < t_1. \quad (17)$$

В третьем периоде ($t > t_1$) в контрольном сечении имеем три зоны: центральную ($r_3 > r > 0$), среднюю ($r_3 < r < r_n$) и периферийную ($r_n < r < R$). При этом составляющие теплового баланса (8) имеют вид:

$$Q_0 = C\rho T_o 2\pi \int_{r_3}^{r_n} v r dr, \quad Q_1 = C\rho T_1 2\pi \int_0^{r_3} v r dr + C\rho T_1 2\pi \int_{r_n}^R v r dr, \quad Q_+ = C\rho T_+ 2\pi \int_0^R v r dr.$$

Подставив эти выражения в уравнение баланса и выполнив интегрирование, найдём:

$$T_+ = T_1 + (T_o - T_1) \frac{2(3n+1)}{(n+1)} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{r_n(t)}{R} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{r_3(t)}{R} \right)^2 + \frac{n}{3n+1} \left(\frac{r_3(t)}{R} \right)^{3+\frac{1}{n}} - \frac{n}{3n+1} \left(\frac{r_n(t)}{R} \right)^{3+\frac{1}{n}} \right], \quad t > t_1.$$

Рассматривая эту формулу совместно с (14), (15), найдём изменение средней температуры на выходе во времени:

$$T_+ = T_1 + (T_o - T_1) \frac{2(3n+1)}{(n+1)} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\ell - \delta}{v_o t} \right)^{\frac{2n}{n+1}} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\ell}{v_o t} \right)^{\frac{2n}{n+1}} + \frac{n}{3n+1} \left(1 - \frac{\ell}{v_o t} \right)^{\frac{3n+1}{n+1}} - \frac{n}{3n+1} \left(1 - \frac{\ell - \delta}{v_o t} \right)^{\frac{3n+1}{n+1}} \right], \quad t > t_1. \quad (18)$$

Введём безразмерные переменные:

$$\theta = \frac{T_+ - T_1}{T_o - T_1}, \quad \tau = \frac{t}{t_o}, \quad \varepsilon = \frac{\delta}{\ell}.$$

Здесь $t_o = (\ell - \delta)/v_o$ — масштаб времени.

В безразмерной форме расчётные формулы (13), (17), (18) можно записать так (общее решение задачи):

$$\theta = \begin{cases} 0, & \text{если } \tau \leq 1 \\ \frac{(3n+1)}{(n+1)} \left(1 - \frac{1}{\tau} \right)^{\frac{2n}{n+1}} - \frac{2n}{n+1} \left(1 - \frac{1}{\tau} \right)^{\frac{(3n+1)}{(n+1)}} & \text{если } 1 < \tau < \frac{1}{1-\varepsilon} \\ \frac{2(3n+1)}{(n+1)} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\tau} \right)^{\frac{2n}{n+1}} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\tau(1-\varepsilon)} \right)^{\frac{2n}{n+1}} + \frac{n}{3n+1} \left(1 - \frac{1}{\tau(1-\varepsilon)} \right)^{\frac{3n+1}{n+1}} - \frac{n}{3n+1} \left(1 - \frac{1}{\tau} \right)^{\frac{3n+1}{n+1}} \right] & \text{если } \tau \geq \frac{1}{1-\varepsilon}. \end{cases} \quad (19)$$

Независимо от соотношения температур основной жидкости и ин-

дикатора в течение переходного периода выполняется условие $\theta < 1$. В ньютоновском случае ($n = 1$) расчётные формулы упрощаются:

$$\theta = \begin{cases} 0, & \text{если } \tau \leq 1 \\ 2\left(1 - \frac{1}{\tau}\right) - \left(1 - \frac{1}{\tau}\right)^2 & \text{если } 1 < \tau < \frac{1}{1-\varepsilon} \\ 4\left[-\frac{1}{2}\frac{1}{\tau} + \frac{1}{2}\frac{1}{\tau(1-\varepsilon)} + \frac{1}{4}\left(1 - \frac{1}{\tau(1-\varepsilon)}\right)^2 - \frac{1}{4}\left(1 - \frac{1}{\tau}\right)^2\right] & \text{если } \tau \geq \frac{1}{1-\varepsilon}. \end{cases} \quad (20)$$

Расчётные кривые отклика для различных значений индекса течения, полученные с помощью выражения (19), представлены на рисунке 4. Значение геометрического симплекса (относительной толщины индикатора) составляло $\varepsilon = 0,1$. Величине $\varepsilon = 0,1$ отвечает граничное значение безразмерного комплекса $(1 - \varepsilon)^{-1} = 1,111$. Расчёты выполнены для трёх значений индекса течения. Значение $n = 1$ отвечает течению ньютоновской жидкости.

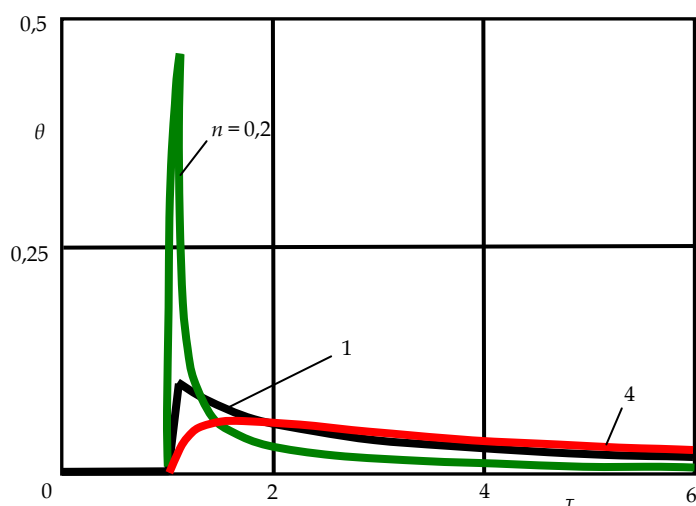


Рис. 4. Кривые отклика при импульсном возмущении при течении различных неньютоновских жидкостей (цифры у кривых — значения индекса течения)

Из рисунка видно, что эффекты аномалии вязкости существенно влияют на характер кривой отклика. В частности, существенно изменяется величина наибольшего всплеска температуры на выходе. С понижением псевдопластических свойств (увеличение индекса течения n)

снижается интенсивность вымывания индикатора. Этот результат вполне согласуется с результатом первой задачи о вытеснении (см. рис. 2). В случае дилатантной жидкости ($n = 4$) рост температуры продолжается даже после того, как вершина заднего фронта миновала контрольное сечение, поскольку максимум соответствующей кривой находится за абсциссой границы $\tau = 1,111$. На стыке второго и третьего периодов в точке $\tau = (1 - \varepsilon)^{-1}$ имеет место разрыв производной, следовательно, это точка излома. Наиболее заметен излом при течении псевдопластика, для дилатантной жидкости излом практически незаметен.

Решение задачи (19) представляет функцию, заданную несколькими формулами. Остановимся несколько подробнее на стыке второго и третьего режимов. Иными словами, рассмотрим решение в окрестности точки с абсциссой $\tau = (1 - \varepsilon)^{-1}$. Слева и справа от рассматриваемой точки решение описывается различными алгебраическими выражениями. В этой точке второе и третье выражения в (19) дают идентичный результат: $\theta = \frac{(3n+1-2n\varepsilon)}{n+1} \varepsilon^{\frac{2n}{n+1}}$. Следовательно, разрыва нет, функция равномерно непрерывна.

Рассмотрим поведение первой производной в этой точке. Производная слева равна

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{2n(3n+1)}{(n+1)^2} \varepsilon^{\frac{n-1}{n+1}} (1-\varepsilon)^3.$$

Производная справа определяется выражением

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \lim_{\tau \rightarrow \frac{1}{(1-\varepsilon)}+0} \frac{d}{d\tau} \left\{ \frac{2(3n+1)}{(n+1)} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\tau} \right)^{\frac{2n}{n+1}} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\tau(1-\varepsilon)} \right)^{\frac{2n}{n+1}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{n}{3n+1} \left(1 - \frac{1}{\tau(1-\varepsilon)} \right)^{\frac{3n+1}{n+1}} - \frac{n}{3n+1} \left(1 - \frac{1}{\tau} \right)^{\frac{3n+1}{n+1}} \right] \right\}. \quad (21)$$

Выполнив дифференцирование, приходим к неопределённости типа «0/0». Для раскрытия неопределённости введём новую бесконечно малую положительную величину Δ как слагаемое параметра ε , входящего в граничное значение τ . При этом получим вместо (21) следующее соотношение:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \lim_{\substack{\tau \rightarrow \frac{1}{(1-\varepsilon-\Delta)} \\ \Delta \rightarrow 0}} \frac{d}{d\tau} \left\{ \frac{2(3n+1)}{(n+1)} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\tau} \right)^{\frac{2n}{n+1}} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\tau(1-\varepsilon)} \right)^{\frac{2n}{n+1}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{n}{3n+1} \left(1 - \frac{1}{\tau(1-\varepsilon)} \right)^{\frac{3n+1}{n+1}} - \frac{n}{3n+1} \left(1 - \frac{1}{\tau} \right)^{\frac{3n+1}{n+1}} \right] \right\}.$$

После несложных преобразований приходим к следующему выражению для производной справа:

$$\lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{d\theta}{d\tau} = \begin{cases} -\infty, & n < 1 \\ \frac{2n(3n+1)}{(n+1)^2} (1-\varepsilon)^3 \varepsilon^{\frac{n-1}{n+1}}, & n > 1. \end{cases}$$

При течении псевдопластика ($n < 1$) первая производная терпит разрыв второго рода. Линия в точке стыка имеет излом, что подтверждает график на рисунке 4, линия отвечающая $n = 0,2$. В случае дилатантной жидкости излом отсутствует (линия отвечающая $n = 4$ на рисунке 4). Полученные формулы неприменимы для ньютоновской жидкости ($n \neq 1$).

В ньютоновском случае ($n = 1$) необходимо непосредственно выполнить дифференцирование выражений (20). При этом имеем: производная слева $\frac{d\theta}{d\tau} = 2(1-\varepsilon)^3$, производная справа $\frac{d\theta}{d\tau} = -2\varepsilon(2-\varepsilon)(1-\varepsilon)$. Функция имеет излом на границе второго и третьего периодов.

Основной недостаток степенного закона при решении задач течения в каналах — это независимость профиля скорости от напряжения на стенке. При любом расходе жидкости степенной закон показывает «застывшую» по форме эпюру осевой скорости (изменяется лишь её «размах»). Конфигурация эпюры полностью определяется единственным параметром — индексом течения — и не зависит от напряжения на стенке. Особенно ярко это проявляется при малых напряжениях на стенке (малых расходах жидкости), когда поведение неньютоновской жидкости приближается к ньютоновской. При этом её свойства отвечают максимальной вязкости, соответственно профиль скорости должен быть близким к квадратичной параболе. Именно в этом случае следует ожидать от математической модели, построенной на степенном законе, наибольшей ошибки в прогнозе интегральных характеристик течения, в том числе формы кривой отклика. Полученные результаты носят по преимуществу качественный характер. Для получения более точных расчётных формул целесообразно при построении математической модели использовать другую реологическую модель, например, модель Эллиса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голованчиков А. Б., Дулькина Н. А., Ильин А. В., Ильина Л. А. Расчёт трубчатого реактора с неньютоновской реакционной массой и маловязким пристенным слоем // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. № 3. Т. 1. С. 16—20.
2. Голованчиков А. Б., Рябчук Г. В., Дулькина Н. А. Расчёт и проектирование политропных реакторов вытеснения с учётом реологических свойств реакционной массы // Известия ВолгГТУ. 2004. № 5. С. 23—27.

3. Голованчиков А. Б., Тябин Н. В. Расчёт реактора вытеснения по кинетическим и реологическим данным // Известия вузов. Химия и хим. технология. 1988. Т. 31. Вып. 11. С. 119–123.
4. Мак-Келви Д. М. Переработка полимеров. М.: Химия, 1965.
5. Пат. 2007702 РФ, МПК G01N 11/00. Способ определения реологических свойств жидкостей / Голованчиков А. Б., Брифф Е. А., Тябин Н. В., Болотин Ю. О., Лаки З.; патентооблад. Волгоградский политехнический институт. № 914949347; заявл. 26.06.1991; опубл. 10.10.2000. Бюл. № 28.

* * *

Lapchina Svetlana V., Shapovalov Vladimir M.**TRANSIENTS-VISCOUS FLUID IN A TUBE**

(Volzhsky Polytechnical Institute (branch of) State Educational Institution of Higher Professional Education 'Volograd State Technical University', Volzhsky, Volgograd region)

Posed and solved the problem of fluid displacement Ostwald-de Waele fluid with excellent temperature in a round pipe. An analytical solution for the problems of filling cases at the entrance step and pulse perturbation system. The results of the calculation of the response curve. In the case of a dilatant fluid on the response curve is not a break.

Keywords: flow, temperature, model Ostwald-de Waele, time, speed.

REFERENCES

1. Golovanchikov A. B., Dulkina N. A., Ilin A. V., Ilina L. A. Calculation of a tubular reactor with a non-Newtonian reaction mass and a low-viscous wall layer [Расчет трубчатого реактора с нениутоновской реакционной массой и маловязким пристенным слоем], *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 3, vol. 1, pp. 16–20.
2. Golovanchikov A. B., Riabchuk G. V., Dulkina N. A. Calculation and design of polytropic displacement reactors taking into account the rheological properties of the reaction mass [Расчет и проектирование политропных реакторов вытеснения с учетом реологических свойств реакционной массы], *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004, no. 5, pp. 23–27.
3. Golovanchikov A. B., Tiabin N. V. Calculation of a repression reactor based on kinetic and rheological data [Расчет реактора вытеснения по кинетическим и реологическим данным], *Izvestiia vuzov. Khimiia i khimicheskaiia tekhnologiia*, 1988, vol. 31, Issue 11, pp. 119–123.
4. McKelvey James M. *Polymer Processing*, John Wiley & Sons Inc, New York, 1962.
5. Golovanchikov A. B., Brieff E. A., Tiabin N. V., Bolotin Iu. O., Laki Z. *Sposob opredeleniia reologicheskikh svoistv zhidkostei* (A method for determining the rheological properties of liquids), patent No. 2007702 of the Russian Federation, MPK G01N 11/00, patent holder Volgograd Polytechnic Institute, publ. 10/10/2000. Bulletin No. 28.

* * *

УДК 725

Н. А. Мазина, Р. Е. Бойчин, А. С. Васильев, В. Л. Земляк**ПРИМЕНЕНИЕ САПР-СИСТЕМЫ REVIT STRUCTURE
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ЗДАНИЙ
И ЭКСПОРТ ДАННЫХ В РЕШАТЕЛЬ ЛИРА САПР**

Данная работа посвящена исследованию возможности проектирования и расчёта несущих конструкций с использованием аналитической модели в программе ПК ЛИРА САПР. В частности, производился расчёт плит перекрытий и колонн здания проектируемого университета. Здание с учётом строительных норм и правил проектировалось в Revit Structure. Затем осуществлялся экспорт модели с последующим расчётом в ПК ЛИРА САПР. В рамках данной работы рассматривалось взаимодействие программы для проектирования Revit Structure и программы для расчёта ЛИРА САПР.

Ключевые слова: строительство, САПР-системы, проект, ПК ЛИРА САПР, САПФИР 3D.

Введение

Цель: исследовать проблемы при экспорте из Revit Structure и построении конечно-элементной модели в ПК ЛИРА САПР.

Задачи исследования:

1. Провести анализ взаимодействия программы для проектирования Revit Structure и программы для расчёта ЛИРА САПР.
2. Предложить алгоритм взаимодействия данных программ между собой с учётом проблем, возникающих при экспорте.

В связи с длительным сроком эксплуатации учебных корпусов университета и их естественным износом возникла необходимость строительства нового комплекса университетских зданий, отвечающих современным требованиям эргономики. Было принято решение разработать комплексный проект ПГУ имени Шолом-Алейхема.

Для главного корпуса ПГУ имени Шолом-Алейхема была выбрана форма эллиптического параболоида, что сказывается на криволинейной

Мазина Анастасия Геннадьевна — магистрант (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: nastena_g78@mail.ru.

Бойчин Роман Евгеньевич — магистрант (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: vellkom@list.ru.

Васильев Алексей Сергеевич — кандидат технических наук, старший преподаватель (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: vasil-grunt@mail.ru.

Земляк Виталий Леонидович — кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе и инновациям (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: vellkom@list.ru.

© Мазина Н. А., Бойчин Р. Е., Васильев А. С., Земляк В. Л., 2017

форме плит перекрытий. Выбор был сделан в связи с рациональностью, эргономичностью и гибкостью планировочных решений.

Разработка проекта корпуса университета

Проектируемое здание университета представляет собой здание с внутренним двором и примыкающими к нему вестибюльной группой, спортзалом и четырьмя учебными корпусами. Центральный блок представляет собой в плане четырёхэтажное здание прямоугольной формы, деформированное с четырёх сторон в форме вогнутой линзы. На рисунке 1 представлен передний фасад здания.

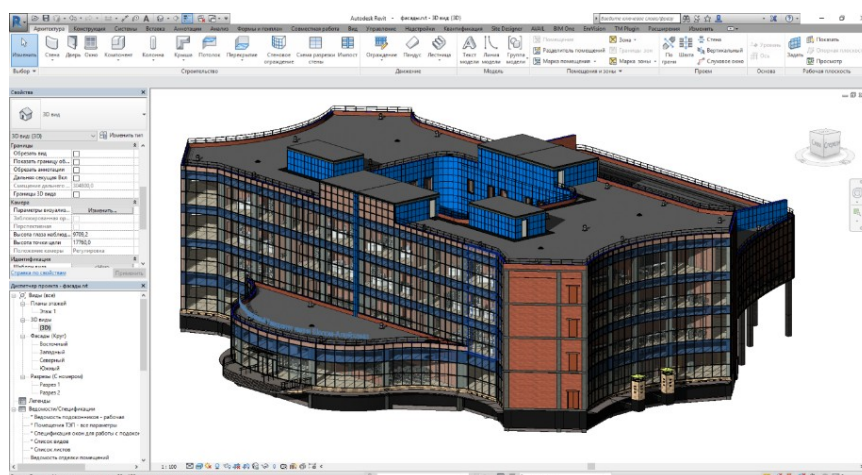


Рис. 1. Передний фасад здания

Кровля университета плоская многослойная с внутренним водосток, в месте прохода деформационного шва, кровля разделяется противопожарной преградой, выход на кровлю обеспечивается двумя выходами, от которых ходовые дорожки ведут в камеру вытяжной вентиляции и комнату уборочного инвентаря. Планировочная структура здания сложная и запроектирована индивидуально, исходя из требований, предъявляемых к высшим учебным заведениям (рис. 2–3).

В подвале здания располагаются камера приточной вентиляции, электрощитовая, тепловой пункт и технические помещения. На первом этаже располагаются вестибюльная группа с предбанником, гардеробом и вахтой. В центральном блоке располагаются столовая с кухней, библиотека с книгохранилищем и санузлы. На втором этаже отдельно вынесен спортзал с тренажёрными залами и раздевалками. В центральном блоке расположены потоковая аудитория, занимающая по высоте второй и третий этажи, компьютерные классы, аудитории, зал для студенческих конференций, кафедры, санузлы, душевые с раздевалками. На третьем этаже расположились канцелярия, архивы, книгохранилище,

читальный зал, медпункт, зал для конференций, кафедра, деканат, технический отдел, спецотдел и санузелы.

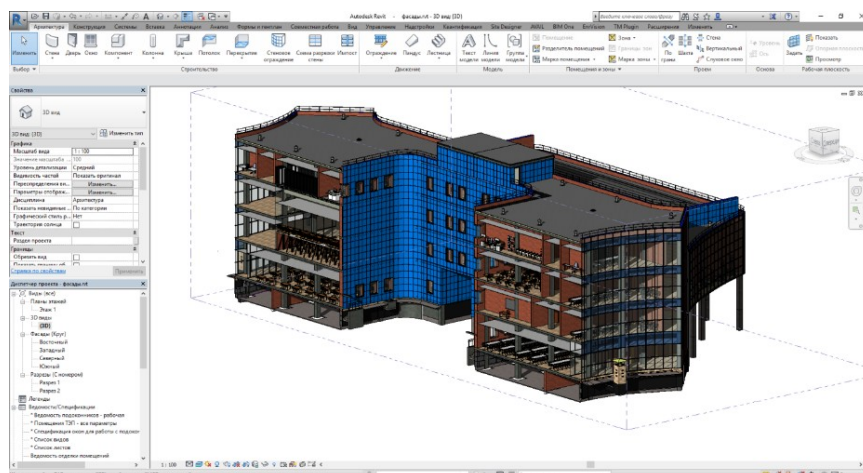


Рис. 2. Разрез здания в продольных осях

На четвёртом этаже находятся типография, отдел кадров, завхоз, проректорские, ректорская с секретариатом, хозяйственный отдел, отдел трудоустройства, отдел по работе со студентами, отдел дополнительного образования, серверная, бухгалтерия с кассой, международный отдел, отдел безопасности, отдел внеучебной и научной работы, а также санузлы. Через крышу имеется доступ к помещениям уборочного инвентаря и камерам вытяжной вентиляции.

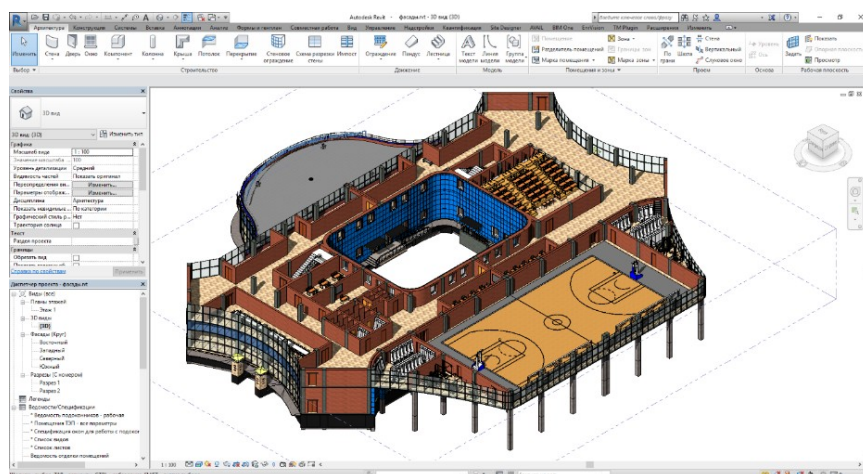


Рис. 3. Внутренняя планировка корпуса университета в Revit Structure

Проект здания выполнен в программном комплексе Revit Structure 2015 учебная версия, согласно требованиям СП 118.13330.2012 «Общественные здания и сооружения».

Аналитическая модель здания, экспортируемая в решатель ЛИРА САПР, содержит в себе не только геометрию, но и физико-механические свойства материалов, из которых состоят несущие элементы здания, и строится на основе BIM (Building Information Model) технологий.

Далее модель сохраняется в универсальном формате *.ifc для дальнейшей отправки в САПФИР с последующим расчётом в ПК ЛИРА САПР (рис. 4).

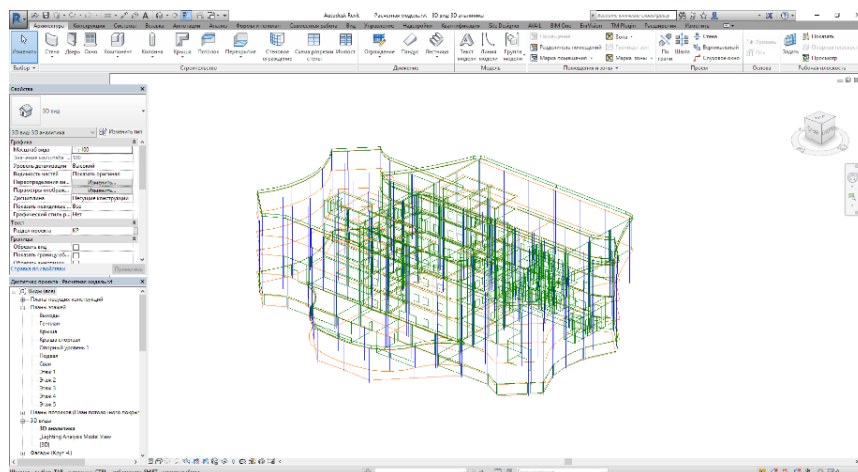


Рис. 4. Сохранение модели в универсальном формате

Для дальнейшей работы модель здания необходимо открыть в программном комплексе САПФИР 3D версии 2015, которая была сохранена ранее (рис. 5).

На следующем этапе работы необходимо удалить элементы, не участвующие в расчёте здания. На основе физической модели, переданной из Revit, создаётся расчётная схема в САПФИР 3D. Для дальнейшей передачи расчётной модели в программный комплекс ЛИРА САПР версии 2013 необходимо произвести триангуляцию (создание конечно-элементной сетки из треугольников) плит перекрытий в программе САПФИР 3D [4, с. 20]. Дискретная модель здания представлена рисунком 6.

Далее осуществляется передача модели здания из программы САПФИР в программу ЛИРА. Необходимо отметить, что при экспорте модели из программы Revit Structure в универсальном формате *.ifc возникли некоторые сложности при отображении конструкции, которые впоследствии были устранены в программе САПФИР 3D, они мешали дальнейшему расчёту в программе ПК ЛИРА САПР.

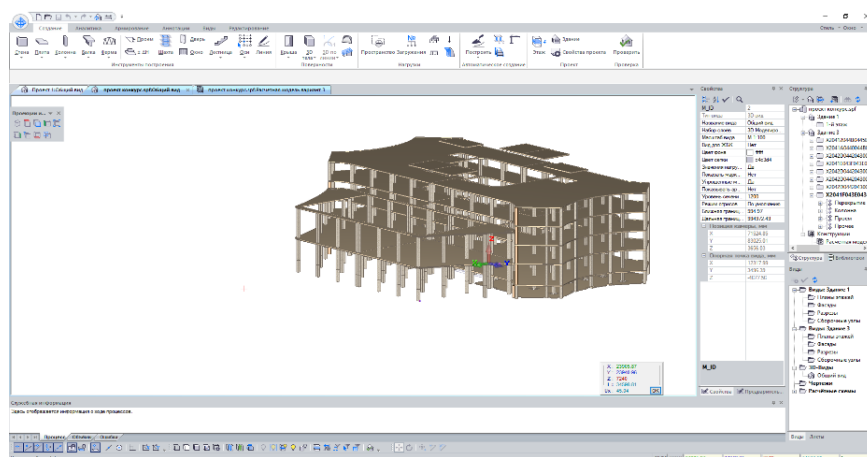


Рис. 5. Физическая модель здания в программе Сапфир

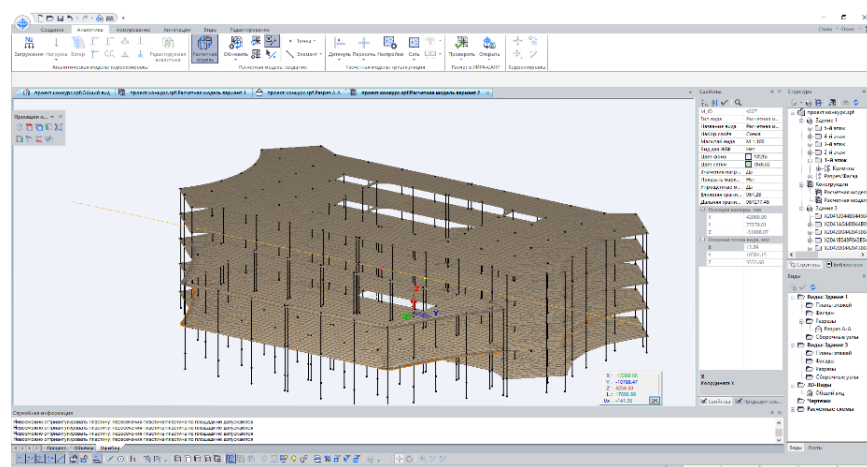


Рис. 6. Дискретная модель здания

Также при создании расчётной схемы в САПФИР 3D наблюдается отсутствие большей части колонн, которые присутствовали на физической модели здания. Чтобы отсутствующие колонны проявились на расчётной схеме, необходимо назначить материал колонн, в данном случае это будет бетон марки В25. Оставшиеся на физической модели колонны на расчётной схеме отображаются не корректно — в виде плоскостей вместо стержней, их необходимо удалить и вместо них создать новые колонны на физической модели, предварительно создав новые уровни.

Заключение

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что для более корректной работы необходимо усовершенствовать передачу аналитической моде-

ли из программы Revit в программный комплекс САПФИР 3D, дополнив его соответствующим экспортирующим модулем. Подобные модули экспорта из Revit в расчётные комплексы есть у многих производителей. Вот пример одного из них — это модуль двухстороннего экспорта данных из Revit в Robot Structural Analysis и обратно с результатами расчёта.

Для удобства установки и использования данный модуль можно разместить в магазине приложений Autodesk (www.app.autodesk.com) в разделе приложений для Revit, где каждый, у кого есть учётная запись Autodesk, может беспрепятственно скачать и установить модуль в Revit для связи с САПФИР 3D, который сможет передать информационную модель здания без потерь информации о несущих элементах в расчётный комплекс ЛИРА САПР.

Данный способ передачи информации из одного программного комплекса в другой может помочь сэкономить время конструктору при выполнении комплексного расчёта несущих конструкций любой сложности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 20.13330.2012 Нагрузки и воздействия.
2. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции.
3. СП 118.13330.2012 Общественные здания и сооружения.
4. Артамонова А. Е., Водопьянов Р. Ю., Гензерский Ю. В., Титок В. П. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2012. Киев; Москва: Электронное издание, 2012. 208 с.

* * *

Mazina Anastasia G., Boychin Roman E., Vasiliev Alexei S., Zemlyak Vitaly L.
APPLICATION OF REVIT STRUCTURE CAD SYSTEMS IN DESIGNING BUILDING
SYSTEMS AND EXPORT OF DATA TO LIRA CADER RESTRICTOR
 (Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan)

His work is devoted to the study of the design and calculation of load-bearing structures using the analytical model in the PC LIRA CAD program. In particular, calculation of slabs and columns of the building of the projected university was carried out. The building, taking into account building codes and rules, was designed in Revit Structure. Then the model was exported and then it was calculated in the PC LIRA CAD. In the framework of this paper, the interaction of the program for designing Revit Structure and the program for calculating the LIRA CAD was considered.

Keywords: structure, CAD-system, project, PC LIRA CAD program, SAPHIR 3D.

REFERENCES

1. SP 20.13330.2012 Loads and impacts (In Russ.).
2. SP 63.13330.2012 Concrete and reinforced concrete structures (In Russ.).
3. SP 118.13330.2012 Public buildings and structures (In Russ.).
4. Artamonova A. E., Vodopyanov R. Yu., Genzersky Yu. V., Titok V. P. *Programmnyj kompleks LIRA-SAPR 2012*, The program complex LIRA-CAD 2012. Kiev; Moscow, 2012. 208 p.

* * *

УДК 539.3:534.1

С. В. Серёгин**ВЛИЯНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ
И ЖЁСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
НА ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ
ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК**

Изучается влияние отверстия и присоединённой к круговой цилиндрической оболочке жёсткости, сосредоточенной на малом участке, на собственные динамические характеристики рассматриваемых систем. Представлена методика расчёта оболочек с отверстиями, основанная на уравнениях теории пологих оболочек. Показано, что результаты динамического расчёта оболочек с отверстиями при соответствующем подборе величины присоединённой массы сопоставимы с результатами расчёта оболочек, несущих сосредоточенную массу.

Ключевые слова: оболочка, собственные частоты, колебания.

Введение

Высокие требования техники к точности моделируемых процессов и определения напряжённо-деформированного состояния конструкций побуждают исследователей искать новые подходы и методы решения задач, уточнять уже существующие решения [1–3], [21–23]. Актуальной задачей на сегодняшний день является обеспечение динамической прочности кольцевых [4–5], [8], [13], [15], [20] и оболочечных [6–7], [9–10], [12], [14], [16–19] конструкций, которые применяются в авиации, навигационных системах и наземной инфраструктуре.

Оболочечные конструкции неизбежно имеют различного рода несовершенства — присоединённые массы, отверстия, которые приводят к специфическим особенностям при изгибных колебаниях оболочек [13–14], [20].

Известно, что для выявления специфических особенностей при изгибных колебаниях оболочек, несущих присоединённые массы, нужно при разложении искомых функций в ряды удерживать достаточно много членов ряда [16], [18], а для оболочек, ослабленных отверстием, математическая сторона задачи усложняется многократно [11].

Серёгин Сергей Валерьевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник управления научно-исследовательской деятельностью (Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре); e-mail: Seregin-komsHome@yandex.ru.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-31-00045 мол_а).

© Серёгин С. В., 2017

В настоящей статье в рамках теории пологих оболочек решается задача о влиянии выреза на собственные частоты и формы колебаний тонкой оболочки. Сделано предположение, что возмущение в напряжённо-деформируемом состоянии, как в случае присоединённой массы, так и при наличии отверстия, одинаково, поэтому при относительно малом вырезе динамические характеристики оболочки с отверстием могут быть найдены при решении известной задачи о колебаниях оболочки, несущей присоединённую массу, при условии, что присоединённая масса равна массе вырезанного элемента [12], [17].

Гипотеза

Сделаем предположение, что динамическое поведение цилиндрической оболочки с отверстием идентично оболочке, несущей присоединённую массу.

Методика решения

Для решения такой задачи будем использовать известные уравнения из теории пологих оболочек [11]:

$$\frac{D}{h} \nabla^4 w = \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{M_c}{h} \delta(x - x_0, y - y_0) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$

$$\frac{1}{E} \nabla^4 \Phi = -\frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2},$$

где $D = Eh^3 / [12(1 - \mu^2)]$ – цилиндрическая жёсткость, h – толщина оболочки, E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона; ∇^4 – бигармонический оператор Лапласа; $w(x, y, t)$ – динамический прогиб, положительный при направлении к оси; R – радиус; Φ – функция напряжений в срединной поверхности; ρ – массовая плотность; x, y – продольная и окружная координаты; x_0, y_0 – координаты размещения центра выреза у оболочки; t – время; M_c – масса вырезанного элемента; $\delta(x, y)$ – функция Дирака, M_c – масса вырезанного элемента, M_{so} – масса идеальной оболочки.

Рассмотрим оболочку со следующими геометрическими и физическими характеристиками:

$$R/h = 200, \quad L/R = 2,5,$$

где $R = 5 \text{ м}$ – радиус оболочки, h – толщина стенки, L – длина, $E = 2 \times 10^{11} \text{ Н/м}^2$ – модуль Юнга, $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ – массовая плотность. На торцевых сечениях оболочки реализуются условия свободного опирания.

Пусть в центре оболочки имеется отверстие прямоугольной формы. Площадь вырезанного отверстия составляет $6,16 \text{ м}^2$. Собственные частоты низших тонов колебаний оболочки следующие: $n = 6$, $\omega_1 = 10,03 \text{ Гц}$, $\omega_2 = 10,69 \text{ Гц}$.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы решим задачу колебаний оболочки, несущей присоединённую сосредоточенную массу, равную массе вырезанного элемента — $M_c = 0,0157 M_{so}$. Собственные частоты колебаний равны: $n = 6$, $\omega_1 = 10,13 \text{ Гц}$, $\omega_2 = 11,01 \text{ Гц}$.

Сопоставление результатов. Основные выводы

Сопоставление результатов динамического расчёта низшей частоты колебаний оболочки с отверстием и оболочки с присоединённой массой говорит о хорошем согласовании. Выполненный расчёт подтверждает выдвинутую гипотезу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А. С. Разработка алгоритмов численного моделирования балочных конструкций из композитных материалов для портовых и берегозащитных сооружений // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2015. № III-1 (23). С. 88 — 93.
2. Ипатов К. И., Земляк В. Л., Козин В. М., Васильев А. С. Исследование напряжённо-деформированного состояния ледяного покрова от воздействия на него движущейся нагрузки // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2017. № 1 (26). С. 103 — 113.
3. Козин В. М., Земляк В. Л. Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом. Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, ПГУ им. Шолом-Алейхема, АмГПУ, 2013. 250 с.
4. Лейзерович Г. С., Приходько Н. Б., Серёгин С. В. О влиянии малой присоединённой массы на колебания разнотолщинного кругового кольца // Строительство и реконструкция. 2013. № 4 (48). С. 38 — 42.
5. Лейзерович Г. С., Приходько Н. Б., Серёгин С. В. О влиянии малой присоединённой массы на расщепление частотного спектра кругового кольца с начальными неправильностями // Строительная механика и расчёт сооружений. 2013. № 6 (251). С. 49 — 51.
6. Лейзерович Г. С., Серёгин С. В. Свободные колебания круговых цилиндрических оболочек с присоединённой малой сосредоточенной массой // Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57. № 5. С. 90 — 96. DOI: 10.15372/PMTF20160510.
7. Серёгин С. В. Влияние асимметричных начальных несовершенств формы на свободные колебания тонких оболочек // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15. № 3. С. 209 — 222. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-209-222.
8. Серёгин С. В. Влияние несовершенств формы на колебания кольцевого резонатора волнового твердотельного гироскопа // Нелинейная динамика. 2017. Т. 13. № 3. С. 423 — 431. DOI: 10.20537/nd1703009.

9. Серёгин С. В. Влияние площади контакта и величины линейно распределённой и сосредоточенной массы с круговой цилиндрической оболочкой на частоты и формы свободных колебаний // Вестник МГСУ. 2014. № 7. С. 64–74. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.7.64-74.
10. Серёгин С. В. Влияние присоединённого тела на частоты и формы свободных колебаний цилиндрических оболочек // Строительная механика и расчёт сооружений. 2014. № 3 (254). С. 35–38.
11. Серёгин С. В. Динамика тонких цилиндрических оболочек с присоединённой массой. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016. 175 с.
12. Серёгин С. В. Исследование динамических характеристик оболочек с отверстиями и присоединённой массой // Вестник МГСУ. 2014. № 4. С. 52–58. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.4.52-58.
13. Серёгин С. В. Качественные эффекты при колебаниях кольцевых подкрепляющих элементов с присоединённой массой как частный случай тонкой бесконечно длинной круговой цилиндрической оболочки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 1 (682). С. 31–43. DOI 10.18698/0536-1044-2017-1-31-43.
14. Серёгин С. В. Об эффекте расщепления изгибного частотного спектра тонких круговых цилиндрических оболочек, несущих присоединённую массу // Строительная механика и расчёт сооружений. 2014. № 6 (257). С. 59–61.
15. Серёгин С. В. Особенности расщепления частотного спектра волнового твердотельного гироскопа на примере изолированного несовершенного кольца // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2017. Т. 10. № 3. С. 116–122. DOI: 10.18721/JPM.10311.
16. Серёгин С. В. Свободные изгибно-радиальные колебания тонкой круговой цилиндрической оболочки, несущей присоединённую массу // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 74–81. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.11.74-81.
17. Серёгин С. В. Свободные колебания тонкой круговой цилиндрической оболочки, ослабленной отверстием // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 9–13.
18. Серёгин С. В. Численное и аналитическое исследование свободных колебаний круговых цилиндрических оболочек, несущих присоединённую массу, линейно распределённую вдоль образующей // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7. № 4. С. 378–384. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.4.36.
19. Серёгин С. В., Лейзерович Г. С. Влияние присоединённой массы на динамические характеристики тонкой оболочки // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 4. С. 83–89.
20. Серёгин С. В., Лейзерович Г. С. Свободные колебания бесконечно длинной круговой цилиндрической оболочки с начальными неправильностями и малой присоединённой массой // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2014. Т. 1. № 4 (20). С. 36–43.
21. Тарануха Н. А., Васильев А. С. Алгоритмы и модели при численном проектировании композитных сред на заданные характеристики для морских сооружений // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2015. № I-1 (21). С. 81–86.
22. Тарануха Н. А., Васильев А. С. Анализ критериев предельного состояния конструкций из композитных материалов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре

- государственного технического университета. 2015. № III-1 (23). С. 81–87.
23. Тарануха Н. А., Васильев А. С. Численное исследование предельной несущей способности конструкций из композитных материалов // Морские интеллектуальные технологии. 2015. Т. 2. № 3 (29). С. 27–32.

* * *

Seregin Sergei V.**THE INFLUENCE OF INERTIAL AND STIFFNESS CHARACTERISTICS ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF THIN SHELLS**

(Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur)

The influence of the hole and the stiffness added to the circular cylindrical shell, focused on a small section, on the intrinsic dynamic characteristics of the systems under consideration is studied. A method is proposed for calculating shells with holes, based on the equations of the theory of shallow shells. It is shown that the results of the dynamic calculation of shells with holes with appropriate selection of the value of the attached mass are comparable with the results of calculations of shells carrying a concentrated mass.

Keywords: shell vibration frequency spectrum, hole, added mass.

REFERENCES

1. Vasil'ev A. S. Development of algorithms for numerical modeling of beam structures from composite materials for port and bank protection structures [Razrabotka algoritmov chislennogo modelirovaniya balochnykh konstrukcij iz kompozitnykh materialov dlja portovyh i beregozashhitnyh sooruzhenij], *Uchjonye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2015, vol. 1, no. 3 (23), pp. 88–93.
2. Ipatov K. I., Zemljak V. L., Kozin V. M., Vasil'ev A. S. Investigation of the stressed-but-deformed state of the ice cover from the impact of a moving load on it [Issledovanie naprjazhjon-no-deformirovannogo sostojanija ledjanogo pokrova ot vozdejstvija na nego dvizhushhejsja nagruzki], *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-AlejHEMA*, 2017, no. 1 (26), pp. 103–113.
3. Kozin V. M., Zemljak V. L. *Fizicheskie osnovy razrushenija ledjanogo pokrova rezonansnym metodom* (Physical basis for the destruction of the ice cover by the resonance method), Komsomolsk-on-Amur, 2013. 250 p.
4. Lejzerovich G. S., Prihod'ko N. B., Seregin S. V. On the influence of a small adjoint mass on the oscillations of a differently circular ring [O vlijanii maloj prisoedinjonoj massy na kolebanija raznotolshhinnogo krugovogo kol'ca], *Stroitel'stvo i rekonstrukcija*, 2013, no. 4 (48), pp. 38–42.
5. Lejzerovich G. S., Prihod'ko N. B., Seregin S. V. On the effect of a small adjoint mass on the splitting of the frequency spectrum of a circular ring with initial irregularities [O vlijanii maloj prisoedinjonoj massy na rasshheplenie chastotnogo spektra krugovogo kol'ca s nachal'nymi nepravil'nostjami], *Stroitel'naja mehanika i raschjot sooruzhenij*, 2013, no. 6 (251), pp. 49–51.
6. Leizerovich G. S., Seregin S. V. Free vibrations of circular cylindrical shells with a small added concentrated mass, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2016, vol. 57, no. 5, pp. 841–846. DOI: 10.15372/PMTF20160510.
7. Seregin S. V. Influence of asymmetric initial imperfections of form on free vibrations of thin shells [Vlijanie asimmetrichnykh nachal'nykh nesovershenstv formy na svobodnye kolebanija tonkih obolochek], *Vestnik Samarskogo universiteta*.

- Ajerokosmicheskaja tehnika, tehnologii i mashinostroenie*, 2016, vol. 15, no. 3, pp. 209–222. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-209-222.
8. Seregin S. V. Influence of shape imperfections on oscillations of the ring resonator of a wave solid-state gyroscope [Vlijanie nesovershenstv formy na kolebanija kol'cevogo rezonatora volnovogo tverdotel'nogo giroskopa], *Nelinejnaja dinamika*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 423–431. DOI: 10.20537/nd1703009.
 9. Seregin S. V. Influence of the contact area and the magnitude of a linearly distributed and concentrated mass with a circular cylindrical shell on the frequencies and forms of free oscillations [Vlijanie ploshhadi kontakta i velichiny linejno raspredel'noj i sosredotochennoj massy s krugovoj cilindricheskoj obolochkoj na chastoty i formy svobodnyh kolebanij], *Vestnik MGSU*, 2014, no. 7, pp. 64–74. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.7.64-74.
 10. Seregin S. V. Influence of an attached body on the frequencies and shapes of free oscillations of cylindrical shells [Vlijanie prisoedinjonnogo tela na chastoty i formy svobodnyh kolebanij cilindricheskih obolochek], *Stroitel'naja mehanika i raschjot sooruzhenij*, 2014, no. 3 (254), pp. 35–38.
 11. Seregin S. V. *Dinamika tonkih cilindricheskih obolochek s prisoedinjonnnoj massoj* (Dynamics of thin cylindrical shells with an attached mass), Komsomolsk-on-Amur, 2016. 175 p.
 12. Seregin S. V. Investigation of the dynamic characteristics of shells with holes and attached mass [Issledovanie dinamicheskikh harakteristik obolochek s otverstijami i prisoedinjonnnoj massoj], *Vestnik MGSU*, 2014, no. 4, pp. 52–58. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.4.52-58.
 13. Seregin S. V. Qualitative effects in the vibrations of annular reinforcing elements with an attached mass as a special case of a thin infinitely long circular cylindrical shell [Kachestvennye jeffekty pri kolebanijah kol'cevyh podkreplajushhih jelementov s prisoedinjonnnoj massoj kak chastnyj sluchaj tonkoj beskonečno dlinnoj krugovoj cilindricheskoj obolochki], *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*, 2017, no. 1 (682), pp. 31–43. DOI 10.18698/0536-1044-2017-1-31-43.
 14. Seregin S. V. On the effect of splitting the flexural frequency spectrum of thin circular cylindrical shells carrying an attached mass [Ob jeffekte rasshheplenija izgibnogo chastotnogo spektra tonkih krugovyh cilindricheskih obolochek, nesushhih prisoedinjonnuju massu], *Stroitel'naja mehanika i raschjot sooruzhenij*, 2014, no. 6 (257), pp. 59–61.
 15. Seregin S. V. Features of the splitting of the frequency spectrum of a wave solid-state gyroscope by the example of an isolated imperfect ring [Osobennosti rasshheplenija chastotnogo spektra volnovogo tverdotel'nogo giroskopa na primere izolirovannogo nesovershennogo kol'ca], *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 116–122. DOI: 10.18721/JPM.10311.
 16. Seregin S. V. Free flexural-radial oscillations of a thin circular cylindrical shell carrying an attached mass [Svobodnye izgibno-radial'nye kolebanija tonkoj krugovoj cilindricheskoj obolochki, nesushhej prisoedinjonnuju massu], *Vestnik MGSU*, 2014, no. 11, pp. 74–81. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.11.74-81.
 17. Seregin S. V. Free vibrations of a thin circular cylindrical shell weakened by a hole, *Russian aeronautics*, 2015, vol. 58, no. 3, pp. 258–262.
 18. Seregin S. V. Numerical and analytical study of free oscillations of circular cylindrical shells carrying an adjoining mass linearly distributed along the generator

- [Chislennoe i analiticheskoe issledovanie svobodnyh kolebanij krugovyh cilindricheskikh obolochek, nesushhih prisoedinjonnuju massu, linejno raspredeljonnuju vdol' obrazujushhej], *Vychislitel'naja mehanika sploshnyh sred*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 378–384. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.4.36.
19. Seregin S. V., Lejzerovich G. S. Influence of the attached mass on the dynamic characteristics of a thin shell [Vlijanie prisoedinjonnoj massy na dinamicheskie harakteristiki tonkoj obolochki], *Problemy mashinostroenija i avtomatizacii*, 2015, no. 4, pp. 83–89.
 20. Seregin S. V., Lejzerovich G. S. Free oscillations of an infinitely long circular cylindrical shell with initial irregularities and a small attached mass [Svobodnye kolebanija beskonечно dlinnoj krugovoj cilindricheskoj obolochki s nachal'nymi nepravil'nostjami i maloj prisoedinjonnoj massoj], *Uchjonye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2014, vol. 1, no. 4 (20), pp. 36–43.
 21. Taranuha N. A., Vasil'ev A. S. Algorithms and models for numerical design of composite media for specified characteristics for offshore structures [Algoritmy i modeli pri chislennom proektirovanii kompozitnyh sred na zadannye harakteristiki dlja morskikh sooruzhenij], *Uchjonye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2015, vol. 1, no. 1 (21), pp. 81–86.
 22. Taranuha N. A., Vasil'ev A. S. Analysis of Criteria for the Limit State of Structures from Composite Materials [Analiz kriteriev predel'nogo sostojanija konstrukcij iz kompozitnyh materialov], *Uchjonye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2015, vol. 1, no. 3 (23), pp. 81–87.
 23. Taranuha N. A., Vasil'ev A. S. Numerical investigation of the ultimate load-bearing capacity of structures made of composite materials [Chislennoe issledovanie predel'noj nesushhej sposobnosti konstrukcij iz kompozitnyh materialov], *Morskie intellektual'nye tehnologii*, 2015, vol. 2, no. 3 (29), pp. 27–32.

* * *

УДК 624, 69.04

Н. А. Тарануха, А. Ю. Резниченко, А. С. Васильев**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ УСИЛЕНИЯ**

Выполнено исследование несущей и деформативной способности железобетонных плит, усиленных различными способами. Представлены результаты напряжённо-деформированного состояния в результате численных расчётов для плит усиленных и без усиления. Разрушающая нагрузка подбиралась исходя из проверочных аналитических расчётов. Моделирование выполнялось при представлении плиты в оригинальной форме, а также в форме тавра. Основная задача исследования — выяснить, как и насколько будут отличаться результаты численных расчётов пустотной плиты при разрушающей нагрузке, моделируя её в естественной и упрощённой тавровой форме. Сопоставление расчётов показывает, что представление усиленных плит в форме тавровых балок для расчётов имеет погрешности. При этом погрешность может зависеть от метода усиления конструкции.

Ключевые слова: математическое моделирование; численное исследование; усиление; железобетонные конструкции; пустотная плита; напряжённо-деформированное состояние; прогиб; тавровая балка.

Введение

В настоящее время пустотные плиты активно используются в строительстве. Преимущество пустотных плит перекрытий — небольшой вес в сравнении с обычными плитами, что позволяет увеличивать их длину для перекрытия относительно больших пролётов. Распространёнными причинами усиления пустотных плит являются: увеличение нагрузок на несущие элементы в результате замены либо усиления вышеразположенных конструкций (перестройка помещений, надстройка зданий); модернизация технологического оборудования в реконструируемом здании, изменение технологических процессов.

Из существующего многообразия различных методов усиления железобетонных плит некоторые методы рассмотрены в данной ста-

Тарануха Николай Алексеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой кораблестроения (Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре); e-mail: taranukha@knastu.ru.

Резниченко Алина Юрьевна — магистрант (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: r.eznichenkoo_alina@mail.ru.

Васильев Алексей Сергеевич — кандидат технических наук, старший преподаватель (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: vasil-grunt@mail.ru.

© Тарануха Н. А., Резниченко А. Ю., Васильев А. С., 2017

ть. Рассмотренные виды усиления пустотных железобетонных плит [3], [10]:

- 1) усиление плиты методом наращивания сечения (набетонка);
- 2) усиление плиты методом дополнительного армирования;
- 3) усиление плиты комбинированным способом.

В данной работе выполняется исследование пустотных плит при действии разрушающей нагрузки, усиленных и без усиления. Для аналитического расчёта пустотная плита была представлена в форме тавровой балки с уменьшением ширины сечения на сумму диаметров каждого пустотного отверстия в плите. В ПК ANSYS плита моделируется как в естественной форме, так и в упрощённой, в форме тавра [6], [7], [9]. Задаёмся вопросом — насколько целесообразно представлять таким способом пустотные плиты при расчёте и насколько велико будет отклонение. Приблизительная разрушающая нагрузка устанавливалась в результате аналитического расчёта с использованием нормативной документации [5], [9], [10].

Сопоставление расчётов показывает, что прогибы, напряжения в арматуре, нормальные напряжения в бетоне по высоте сечения разнятся в зависимости от того, как представлена плита: в форме тавра или в её естественной форме.

Численное исследование напряжённо-деформированного состояния усиленных пустотных плит средствами ПК ANSYS

Проектирование плит выполнялось в модуле программы ANSYS Design Modeller. Затем осуществлялся расчёт в ANSYS Mechanical. Для железобетона использовался конечный элемент Solid 65, позволяющий выполнять нелинейные расчёты с учётом модели разрушения Willam-Warnke. Для отображения трещин была добавлена пользовательская функция в форме деформационного критерия Базанта, позволяющего учитывать трещинообразование в плитах и визуализировать этот процесс средствами ANSYS. Также по краям были смоделированы опоры, на которых держится плита. Конечно-элементная сетка использовала КЭ в форме гексаэдра с максимальным размером 20 мм, показана на рисунке 2.

Подобным образом выполнены расчёты в работах [1], [2], [4], [12]. Распределённая нагрузка, действующая на плиту, была приблизительно получена из аналитических расчётов. В результате выполнялось нагружение плит фиксированной нагрузкой. На первом шаге приложения разрушающей нагрузки образовывался пластический шарнир, происходило смещение нейтральной оси в сжатую зону и перераспределение усилий внутри плиты, обусловленное ползучестью бетона. На следующем шаге происходило непосредственно разрушение, обусловленное превышением предела текучести в арматуре и разрушением плиты.

Для исследования взята пустотная плита (по типу ПБ 41-9-8) со следующими характеристиками: номинальные размеры плиты в плане, $0,8 \times 4$ м ($L = 4000$ мм, $b = 800$ мм); высота $h = 200$ мм; бетон тяжёлый, подвергнутый тепловой обработке, класса В25 ($R_{bt1} = 14,5$ МПа, $R_{bt1} = 1,05$ МПа, $E_{bt1} = 3 \cdot 10^4$ МПа); рабочая продольная арматура А-400 ($R_s = 365$ МПа, $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа) стержневая 3 штуки диаметром 18 мм ($R_s = 365$ МПа). Геометрические характеристики приведены на рисунке 1 [8], [11].

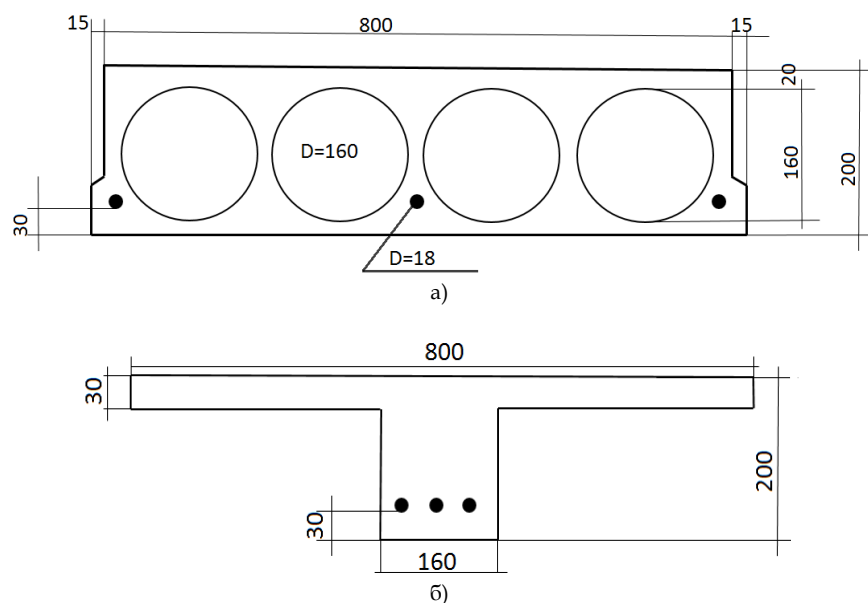


Рис. 1. Сечения пустотной железобетонной плиты без усиления, представленные: а) в естественной форме; б) в форме тавра

Данные об усилении:

1 способ усиления — наращение бетона толщиной 50 мм на верхней части плиты. Характеристики: бетон класса В30 ($R_{bt2} = 17$ МПа, $R_{bt2} = 1,15$ МПа, $E_{bt2} = 33 \cdot 10^4$ МПа);

2 способ усиления — применение дополнительной арматуры в растянутой зоне, рабочая продольная арматура стержневая 2 штуки диаметром по 10 мм класса А-400 ($R_s = 365$ МПа, $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа).

3 способ — усиление комбинированным способом: 50 мм наращение бетона класса В30 ($R_{bt2} = 17$ МПа, $R_{bt2} = 1,15$ МПа, $E_{bt2} = 33 \cdot 10^4$ МПа) плюс дополнительная арматура в растянутой зоне, рабочая продольная арматура стержневая 2 штуки диаметром по 10 мм класса А-400 ($R_s = 365$ МПа, $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа).

Усиление комбинированным способом представлено на рисунке 2.

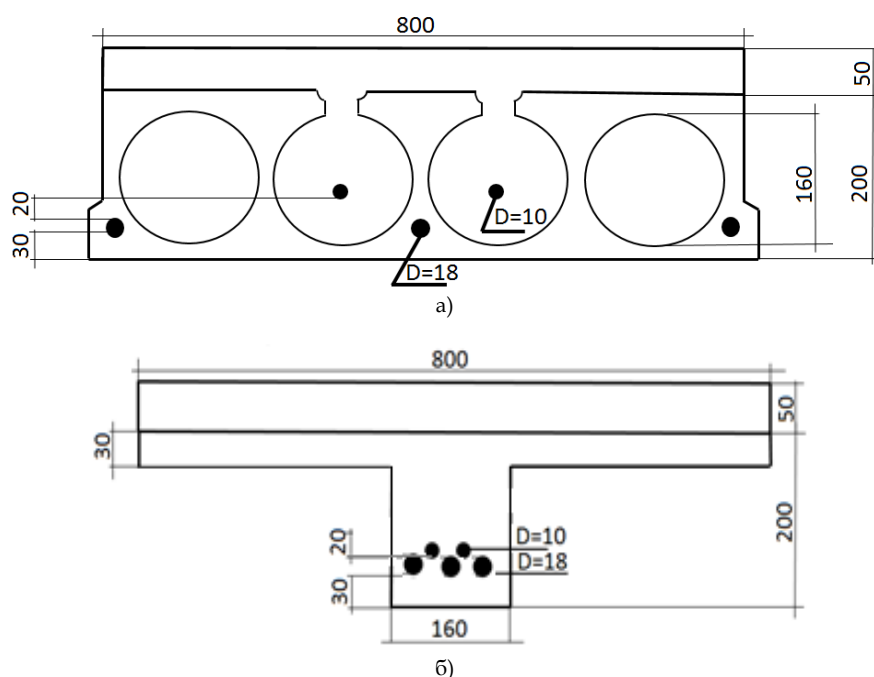


Рис. 2. Сечения пустотной железобетонной плиты, усиленной комбинированным способом, представленные: а) в естественной форме; б) в форме тавра

В таблице 1 представлены результаты расчётов прогибов усиленных пустотных плит от разрушающей нагрузки, рассчитанных в ПК ANSYS для пустотной плиты в натуральной форме и в форме тавра, а также аналитически. В таблице 2 приведены отклонения расчётов прогибов для пустотной плиты, рассчитанной в ANSYS. За эталон принято представление плиты в натуральной форме. Будем считать, что наиболее точными являются расчёты в ANSYS и, соответственно, между ними найдём отклонение.

На рисунке 3 показаны прогибы не усиленной натуральной плиты, а также плиты в форме тавра при разрушающей нагрузке. На рисунке 4 представлены напряжения в арматурных стержнях на первом шаге нагрузки.

В таблице 3 сведены полученные результаты нормальных напряжений в арматуре рассматриваемых плит перекрытий, для плиты в естественной форме, рассчитанной в ANSYS, а также для плиты в форме тавра, рассчитанной в ANSYS. За эталон принята натуральная плита.

На рисунке 5 показано сопоставление графиков нормальных напряжений по высоте сечения плиты при первом шаге нагрузки. Равенство напряжений нулю в нижней части сечения плиты показывает, что там произошло разрушение конечных элементов, и эта часть сечения в работе не участвует.

Таблица 1.

Прогибы для всех видов рассматриваемых плит

Шаг нагрузки	Рассматриваемые плиты	Расчёт в ANSYS натуральной плиты, прогиб f , мм	Расчёт в ANSYS плиты в форме тавра, прогиб f , мм	Аналитический расчёт плиты в форме тавра, прогиб f , мм
Последний	Плита без усиления, при разрушающей нагрузке $q = 21,7$ кН/м;	28,34	28,258	29,41
	Плита, усиленная наращением в 50 мм, при разрушающей нагрузке $q = 25$ кН/м;	22,9	21,987	24,32
	Плита, усиленная дополнительным армированием, при разрушающей нагрузке $q = 30,7$ кН/м;	33,63	31,261	35,23
	Плита, усиленная комбинированным способом, при разрушающей нагрузке $q = 43,8$ кН/м.	29,92	28,407	33,34

Таблица 2.

Отклонения расчёта прогибов

Рассматриваемые плиты	Отклонения расчёта прогибов в ANSYS натуральной плиты от расчёта ANSYS плиты в форме тавра, %
Плита без усиления, при разрушающей нагрузке $q = 21,7$ кН/м;	0,3
Плита, усиленная наращением в 50 мм, при разрушающей нагрузке $q = 25$ кН/м;	4
Плита, усиленная дополнительным армированием, при разрушающей нагрузке $q = 30,7$ кН/м;	7
Плита, усиленная комбинированным способом, при разрушающей нагрузке $q = 43,8$ кН/м.	5

Немного выше, но всё ещё в растянутой зоне плиты можно наблюдать небольшую величину растягивающих напряжений, но в месте, где размещена арматура, напряжение большое, но оно не превышает нормативные данные в 365 МПа. Как показано на графиках рисунка 5а распределения напряжения по высоте сечения плиты без усиления, для плиты в форме тавра составили около 10 МПа при растяжении и – 15 МПа при сжатии волокон. Для пустотной плиты без усиления 0,1 МПа при растяжении и – 9,3 МПа при сжатии. На рисунке 5б показаны графики распределения напряжения по высоте сечения усиленной плиты наращением, для плиты в форме тавра составили около 120 МПа при растяжении и – 3,8 МПа при сжатии волокон. Для пустотной плиты, усиленной наращением, 0,5 МПа при растяжении и – 4,3 МПа при сжатии.

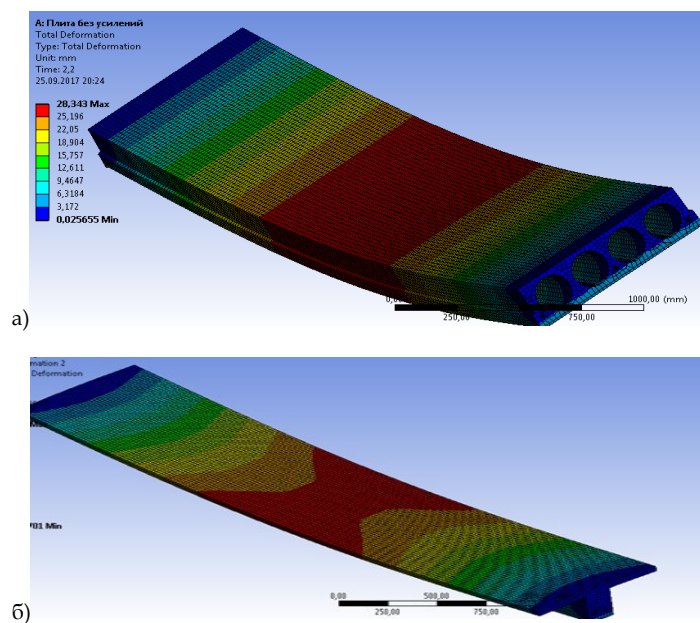


Рис. 3. Конечно-элементные модели, полученные в ANSYS:

- а) пустотной плиты в натуральной форме,
б) пустотной плиты в форме тавра

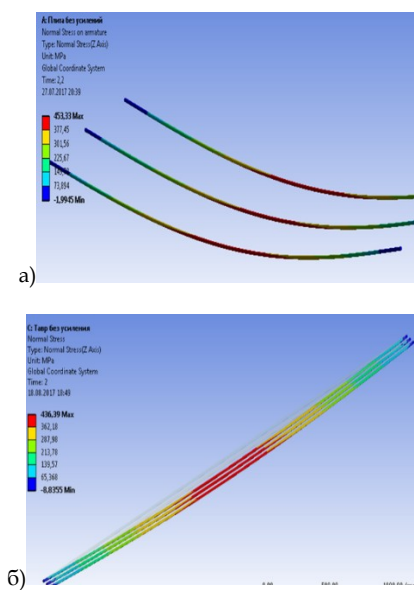


Рис. 4. Напряжения в арматуре на первом шаге нагрузки

- для пустотной плиты: а) в естественной форме,
б) в форме тавра

Таблица 3.

Нормальные напряжения в арматуре рассматриваемых плит

Шаг нагрузки	Рассматриваемые плиты	Расчёт в ANSYS напряжения натуральной плиты, МПа	Расчёт в ANSYS напряжения плиты в форме тавра, МПа	Отклонения напряжения в арматуре расчёта в ANSYS натуральной пустотной плиты от расчёта в ANSYS плиты в форме тавра, %
Последний	Нормальные напряжения в арматуре для плиты без усиления.	453,33	436,39	3,7
	Нормальные напряжения в арматуре для плиты, усиленной наращиванием сечения.	481,07	446,3	7
	Нормальные напряжения в арматуре для плиты, усиленной дополнительной арматурой.	512,13	475,12	7,8
	Нормальные напряжения в арматуре для плиты, усиленной комбинированным способом.	634,66	570,25	10

На рисунке 5в показаны графики распределения напряжения по высоте сечения усиленной плиты дополнительным армированием, для плиты в форме тавра составили около 140 МПа при растяжении и – 16,7 МПа при сжатии волокон. Для пустотной плиты, усиленной дополнительным армированием, 0,5 МПа при растяжении и – 12,5 МПа при сжатии. На рисунке 5г показаны графики распределения напряжения по высоте сечения усиленной плиты комбинированным способом, для плиты в форме тавра составили около 160 МПа при растяжении и – 6,2 МПа при сжатии волокон. Для пустотной плиты, усиленной комбинированным способом, 0,5 МПа при растяжении и – 5,6 МПа при сжатии.

На рисунке 6 показано сопоставление графиков нормальных напряжений по высоте сечения плиты на втором шаге нагрузки. В целом из рисунка 6 видно, что напряжения, равные нулю в нижней части сечения плиты, для плиты в форме тавра такие же, как и для пустотной плиты. Значение напряжения на последнем шаге нагрузки по высоте сечения для плиты в естественной форме и для плиты в форме тавра одинаковы.

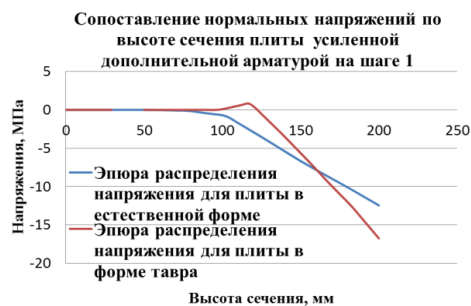
На рисунке 7 показано трещинообразование в плите на стадии разрушения.



а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Сопоставление нормальных напряжений по высоте сечения плит на шаге 1: а) без усиления; б) усиленной наращиванием сечения; в) усиленной дополнительной арматурой; г) усиленной комбинированным способом

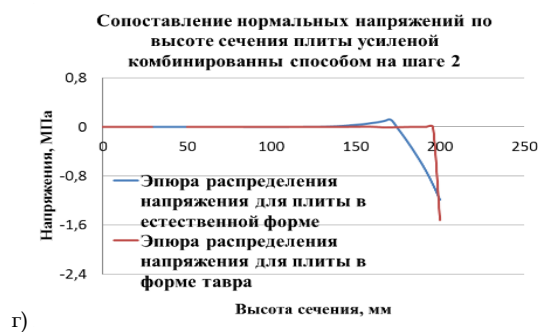
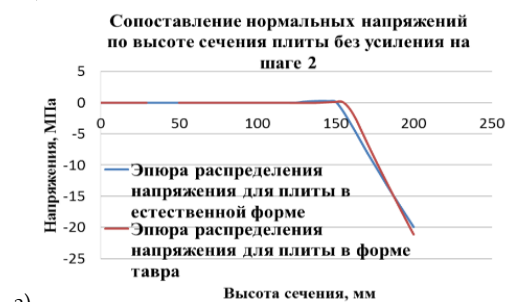


Рис. 6. Сопоставление нормальных напряжений по высоте сечения для плиты на шаге 2: а) без усиления; б) усиленной наращиванием сечения; в) усиленной дополнительной арматурой; г) усиленной комбинированным способом

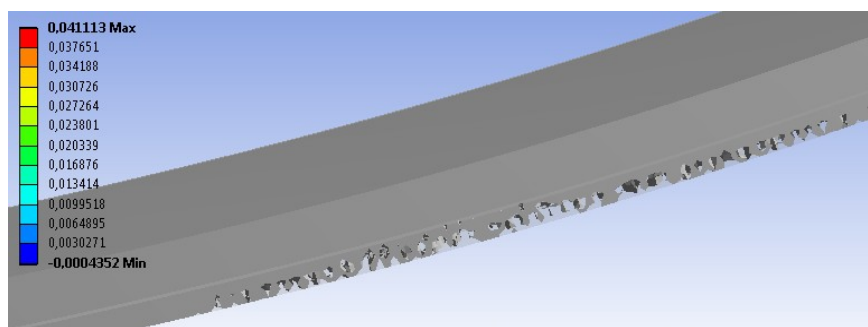


Рис. 7. Появление трещин в плите

Выполненные исследования позволяют сделать ряд выводов.

Заключение

1. Исследование прогибов усиленных пустотных плит от разрушающей нагрузки, рассчитанных в ПК ANSYS, для пустотной плиты в натуральной форме и в форме тавра, а также аналитически, показало, что результаты прогибов плиты в той или иной форме различны. Отклонение расчёта в ANSYS прогибов натуральной плиты от расчёта в ANSYS плиты в форме тавра: для плиты без усиления составило 0,3 %; для плиты, усиленной наращением сечения, составило 4 %; для плиты, усиленной дополнительным армированием, составило 7 %; для плиты, усиленной комбинированным способом, составило 5 %. Это значит, что в действительности плита, представляемая в естественной форме для расчётов, менее жесткая, чем представленная в форме тавра.

2. Отклонения напряжения в арматуре расчёта в ANSYS натуральной пустотной плиты от расчёта в ANSYS плиты в форме тавра: для плиты без усиления составило 3,7 %; для плиты, усиленной наращением сечения, составило 7 %; для плиты, усиленной дополнительным армированием, составило 7,8 %; для плиты, усиленной комбинированным способом, составило 10 %.

3. Максимальное напряжение по высоте сечения плиты на первом шаге нагрузки для плиты в форме тавра выше, чем для плиты в естественной форме, в среднем на 26 % для различных способов усиления. Максимальное напряжение по высоте сечения плиты на втором шаге при разрушении для плиты в форме тавра приблизительно такое же, как для плиты в естественной форме. При этом после первого шага нейтральная ось смещается меньше в сторону сжатой зоны для плиты в естественной форме. Это значит, что прочностные характеристики плиты при представлении её в естественной форме, немного выше.

4. На втором шаге нагружения (при разрушении) также можно заметить более медленный рост нормальных напряжений по сечению плиты, смоделированной в естественной форме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А. С., Бойчин Р. Е., Земляк В. Л. Численное моделирование и расчёт выступа колонны в современных программных комплексах // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2017. № 1 (26). С. 79 – 89.
2. Гучкин И. С., Панков А. В. Диагностика состояния и проектирование усиления железобетонных балок: учеб. пособие. Пенза: ПГУАС, 2012. 120 с.
3. Ипатов К. И., Земляк В. Л., Козин В. М., Васильев А. С. Исследование напряжённо-деформированного состояния ледяного покрова от воздействия на него движущейся нагрузки // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2017. № 1 (26). С. 103 – 113.
4. Климов С. В., Юрина Т. В., Бугаев С. Л. Проектирование и расчёт железобетонных многопустотных плит перекрытий. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. 79 с.
5. Клованич С. Ф., Безушко Д. И. Метод конечных элементов в расчётах пространственных железобетонных конструкций. Одесса: Изд-во ОНМУ, 2009. 89 с.
6. Клованич С. Ф., Мироненко И. Н. Метод конечных элементов в механике железобетона. Одесса, 2007. 111 с.
7. Муленкова В. И., Артюшин Д. В. Расчёт и конструирование усиления железобетонных и каменных конструкций: учеб. пособие. Пенза: ПГУАС, 2014. 118 с.
8. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101-2003). М.: ОАО «ЦНИИПромзданий», 2005. 214 с.
9. Рекомендации по усилению и ремонту строительных конструкций инженерных сооружений. Утв. 01.01.1997; актуал. 01.01.2018. М: ЦНИИПромзданий, 1997. 178 с. URL: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293851/4293851495.htm>
10. СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования» / Госстрой России. М.: ФГУП ЦПП, 2003.
11. Тарануха Н. А., Васильев А. С. Численное исследование конструкций из гетерогенных сред на основе метода конечных элементов // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2017. № 1 (26). С. 90 – 102.

* * *

Taranukha Nikolay A, Reznichenko Alina Y., Vasiliev Alexei S.
NUMERICAL INVESTIGATION OF THE STRESSED-DEFORMED CONDITION
OF REINFORCED CONCRETE PLATES IN DIFFERENT METHODS OF STRENGTHENING
 (Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur;
 Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan)

The investigation of the bearing and deformability of reinforced concrete slabs reinforced by various methods is performed. The results of the stress-strain state as a result of numerical calculations for plates reinforced and without amplification are presented. The destructive load was selected on the basis of verification analytical calculations. Simulation was performed when the plate was presented in its original form, as well as in the form of a brand. The main task of the study is to find out how and how much the results of numerical calculations of a hollow plate with a destructive load will differ, simulating it in a natural and simplified T-shape. Comparison of calculations shows that the representation of reinforced plates in the form of T-beams for calculations has inaccuracies. In this case, the error may depend on the method of strengthening the structure.

Keywords: mathematical modeling; numerical research; strengthening; reinforced concrete structures; hollow plate; stress-strain state; deflection; t-beam.

REFERENCES

1. Vasilev A. S., Boichin R. E., Zemliak V. L. Numerical simulation and calculation of the column protrusion in modern software systems [Chislennoe modelirovanie i raschet vystupa kolonny v sovremennykh programmnykh kompleksakh], *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleikhema*, 2017, no. 1 (26), pp. 79–89.
2. Guchkin I. S., Pankov A. V. *Diagnostika sostoianiia i proektirovanie usileniia zhelezobetonnykh balok* (Diagnostics of the state and design of reinforcement of reinforced concrete beams), Penza, PGUAS Publ., 2012. 120 p.
3. Ipatov K. I., Zemliak V. L., Kozin V. M., Vasilev A. S. Investigation of the stressed-but-deformed state of the ice cover from the impact of a moving load on it [Issledovanie napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia ledianogo pokrova ot vozdeistviia na nego dvizhushcheisia nagruzki], *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleikhema*, 2017, no. 1 (26), pp. 103–113.
4. Klimov S. V., Iurina T. V., Bugaev S. L. *Proektirovanie i raschet zhelezobetonnykh mnogopustotnykh plit perekrytii* (Design and calculation of reinforced concrete hollow core slabs), Perm, Publishing house of Perm. state. tech. University, 2008. 79 p.
5. Klovanih S. F., Bezushko D. I. *Metod konechnykh elementov v raschetakh prostranstvennykh zhelezobetonnykh konstruktsii* (Finite element method in calculations of spatial reinforced concrete structures), Odessa, ONMU Publ., 2009. 89 p.
6. Klovanih S. F., Mironenko I. N. *Metod konechnykh elementov v mekhanike zhelezobetona* (Finite Element Method in the Mechanics of Jelly-Concrete), Odessa, 2007. 111 p.
7. Mulenkova V. I., Artiushin D. V. *Raschet i konstruirovanie usileniia zhelezobetonnykh i kamennykh konstruktsii* (Calculation and construction of reinforcement of iron-concrete and stone structures), Penza, PGUAS Publ., 2014. 118 p.
8. Manual on the design of concrete and reinforced concrete structures from heavy concrete without prestressing the reinforcement (to SP 52-101-2003). Moscow, 2005. 214 p. (In Russ.).
9. Recommendations on strengthening and repair of building structures of engineering structures, Approved. 01/01/1997, Actual. 01/01/2018, Moscow, 1997. 178 p. Available at: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293851/4293851495.htm> (In Russ.).
10. Building regulations 2.01.07-85* «Loads and impacts. Norms of projecting», Moscow, 2003. (In Russ.).
11. Taranukha N. A., Vasilev A. S. Numerical study of structures from heterogeneous media based on the finite element method [Chislennoe issledovanie konstruktsii iz geterogennykh sred na osnove metoda konechnykh elementov], *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleikhema*, 2017, no. 1 (26), pp. 90–102.

* * *

Порядок публикации статей в журнале

1. Общие положения

1.1. Научно-образовательный журнал «Вестник Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема» (далее — Вестник, журнал) выходит четыре раза в год (один раз в квартал) и включает в себя следующие направления:

- 05.02.00 — Машиностроение и машиноведение;
- 05.13.00 — Информатика, вычислительная техника и управление;
- 10.01.00 — Литературоведение;
- 10.02.00 — Языкознание;
- 25.00.00 — Науки о Земле.

1.2. В редакционный совет Вестника принимаются к рассмотрению только оригинальные, ранее нигде не публиковавшиеся статьи на русском языке, имеющие авторскую справку и экспертное заключение о возможности опубликования.

1.3. Статьи, предлагаемые к публикации в журнале, проходят обязательное рецензирование и проверку на определение авторства и степени уникальности текста (от 75 % и выше) через поисковые системы интернета и программу «Антиплагиат» (с использованием установок «глубокая проверка»), а также обязательную выборочную редакторскую проверку текстов. Редакционный совет оставляет за собой право отклонить статью или вернуть её на доработку.

1.4. Принадлежность и объём авторских прав на публикуемые в журнале материалы определяются действующим законодательством Российской Федерации. Допускается распространение по электронным сетям любых статей журнала или выдержек из них с обязательной ссылкой на первоисточник. Запрещается издание материалов Вестника третьими лицами или организациями на бумажных и твердых электронных носителях без разрешения редакционного совета.

1.5. Каждый автор может быть автором или соавтором не более двух статей в одном номере Вестника. Количество статей одного автора, публикуемых в одном номере Вестника, может быть увеличено только по специальному решению редакционного совета.

1.6. Опубликование в Вестнике научных статей профессорско-преподавательского состава, аспирантов, соискателей университета производится бесплатно. Каждому автору выдается бесплатно один экземпляр Вестника с его статьёй. Авторские гонорары не выплачиваются. Рукописи и сопутствующие материалы не возвращаются.

1.7. Контрольные сроки представления статей в очередной номер:

№ 1 до 31 января; № 3 до 31 июля;
№ 2 до 30 апреля; № 4 до 31 октября.

1.8. Статьи, не удовлетворяющие требованиям к оформлению (см. п. 2), к публикации не принимаются и возвращаются авторам на доработку без их рассмотрения по существу.

2. Требования к оформлению статьи

2.1. Статья принимается в бумажном (1 экз.) и электронном виде. К статье прилагаются:

- экспертное заключение о возможности опубликования (прил. 1)¹;
- автором могут быть дополнительно представлены рецензия на статью и отчет программы «Антиплагиат» с результатами проверки;
- отзыв научного руководителя (для аспирантов).

2.2. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами, подписи ставятся в конце рукописи.

2.3. Объем должен составлять от 4 до 16 страниц текста для статьи и от 2 до 4 страниц текста для сообщения, включая список литературы, таблицы и рисунки.

2.4. Обязательные элементы статьи:

- номер УДК (универсальный десятичный классификатор, располагается на первой странице в левом верхнем углу);
- информация об авторе (соавторах) на русском и английском языках: Фамилия Имя Отчество автора, учёная степень, учёное звание, место работы (полное название организации), должность, адрес с индексом, контактный телефон и адрес электронной почты;
- название статьи на русском и английском языках;
- аннотация на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- текст статьи;
- пристатейные списки литературы на русском языке и латинице — References (в романском алфавите);
- рисунки, схемы и подрисуночные подписи к ним (на отдельных листах).

2.5. Рекомендации по содержанию английских текстов и транслитерации:

2.5.1. Фамилии авторов — транслитерируются:

- для автора важно выбрать один вариант написания фамилии и придерживаться его во всех статьях;
- использовать систему транслитерации (прил. 2);

Пример: Nikolaeva Valentina V.

¹ Порядок публикации статей в журнале с приложениями размещен на странице сайта Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема (<http://pgusa.ru/ru/vestnik/rules>)

2.5.2. Перевод названия организации.

Перевод — официальный вариант полного названия организации на английском языке (как в уставе):

- минимум: название организации, город, страна;
- аббревиатура нежелательна или в скобках после полного названия.

Пример: Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia.

2.5.3. Аннотация на английском языке к русскоязычной статье призвана выполнять функцию независимого от статьи источника информации. Она должна быть:

- информативной (не содержать общих слов);
- оригинальной (не является буквальным переводом русскоязычной аннотации);
- содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований);
- структурированной (следовать логике описания результатов в статье);
- «англоязычной» (написанной качественным английским языком);
- компактной, но не короткой (в пределах от 150 до 250 слов).

2.5.4. Структуру и примеры оформления пристатейных списков литературы на латинице — References см. в прил. 3.

2.6. Технические требования к оформлению статьи:

- лист формата A4, книжная ориентация, страница с зеркальными полями;
- поля слева — 2,4 см, справа — 6,4 см, сверху — 2,4 см и снизу — 8 см;
- положение переплета слева;
- текст набран в редакторе MS Word;
- гарнитура шрифта Book Antiqua;
- межстрочный одинарный (1) интервал;
- размер шрифта основного текста 10 pt;
- размер шрифта обязательных элементов статьи (п. 2.4, кроме текста статьи) 8 pt.
- абзацный отступ 0,75 см;

2.7. Сокращения слов, кроме общепринятых или специально оговоренных автором, не допускаются.

2.8. Цитируемая литература приводится отдельным списком и оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008. Ссылки на литературу в тексте оформляются квадратными скобками и содержат порядковый номер списка и страницы. Например, [25, с. 359]. Примеры затекстовых ссылок (пристатейных списков) см. в прил. 4.

2.9. Примечания оформляются в виде сносок с постраничной нумерацией.

2.10. Формулы нумеруются в круглых скобках.

2.11. Таблицы должны иметь заголовки и сквозную порядковую нумерацию в пределах статьи.

2.12. Весь иллюстративный материал (графики, схемы, фотографии, карты) именуется рисунками и имеет сквозную порядковую нумерацию. Количество таблиц и рисунков в статье — не более 6.

2.12.1. Рисунки в текст не вставляются, но в тексте даётся обозначение, где должен быть рисунок.

2.12.2. Рисунки выполняются в формате gif, tiff, jpeg, bmp, представляются в виде отдельных файлов и распечатываются на отдельных листах. Подписи к рисункам печатаются на отдельном листе.

2.13. Ответственность за содержание, соответствие языковым и литературным нормам представленных статей, а также за соблюдение авторского права при использовании иллюстративного и иного материала несёт автор статьи.

3. Организация рецензирования

3.1. Все научные статьи, поступившие в редакционный совет Вестника, подлежат обязательному рецензированию.

3.2. Главный редактор (зам. главного редактора), ответственный редактор выпуска, технический редактор издательства определяют соответствие статьи профилю журнала, требованиям к оформлению и направляют её на рецензирование.

3.3. Для проведения рецензирования рукописей статей в качестве рецензентов могут привлекаться как члены редакционного совета, так и высококвалифицированные учёные и специалисты Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема и других научных и образовательных учреждений (доктора наук, профессора или кандидаты наук, доценты), имеющие близкую к теме статьи научную специализацию. Рецензентом не может быть автор или соавтор рецензируемой работы.

3.4. Сроки рецензирования в каждом отдельном случае определяют ответственным редактором выпуска журнала.

3.5. Рецензирование проводится конфиденциально. Автору статьи предоставляется возможность ознакомиться с текстом рецензии.

3.6. Текст отрицательной рецензии направляется автору от имени редакционного совета Вестника.

3.7. Наличие положительной рецензии не является достаточным основанием для публикации статьи. Окончательное решение о целесообразности публикации принимается главным редактором или его заместителем.

3.8. После принятия редсоветом журнала решения о допуске статьи к публикации ответственный редактор выпуска или ответственный секретарь Вестника информируют об этом автора и указывают сроки публикации.

3.9. Оригиналы рецензий хранятся в редакции Вестника в течение 5 лет со дня публикации, копии рецензий направляются в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию журнала соответствующего запроса.

4. Требования к содержанию рецензии

4.1. Рецензия должна содержать квалифицированный анализ материала статьи, объективную и аргументированную его оценку и обоснованные рекомендации.

4.2. Рецензия должна содержать ФИО автора (ов) и название рецензируемой статьи, дату составления рецензии, подпись рецензента, сведения о рецензенте (ФИО, учёное звание и степень, место работы, должность).

4.3. В рецензии освещаются следующие вопросы: соответствует ли содержание статьи заявленной в названии теме и современным достижениям научно-теоретической мысли; доступна ли статья читателям, на которых она рассчитана, с точки зрения языка, стиля, расположения материала, наглядности таблиц, диаграмм, рисунков и формул; целесообразна ли публикация статьи с учётом ранее выпущенной по данному вопросу литературы; в чём конкретно заключаются положительные стороны, а также недостатки статьи, какие исправления и дополнения должны быть внесены автором.

4.4. В заключительной части рецензии должны содержаться выводы о статье в целом и чёткая рекомендация о целесообразности её издания в Вестнике (рекомендуется с учётом исправления отмеченных рецензентом недостатков или не рекомендуется к публикации в журнале) по конкретному научному направлению, соответствующему номенклатуре научных специальностей, утвержденных ВАК РФ.

Статьи принимаются по адресу

679015, г. Биробиджан, ул. Широкая, 70-А,
ПГУ им. Шолом-Алейхема, Издательский центр, 215 ауд.
тел. (42622)46369, факс (42622)46611, e-mail: bir. izdatel@gmail. com
(с пометкой «Статья в Вестник ПГУ им. Шолом-Алейхема»)

* * *

Внимание!

Подписку на журнал можно оформить в любом почтовом отделении.
Смотрите каталог Агентства «РОСПЕЧАТИ». Индекс подписки 25257.

Attention!

Subscription to the journal can be accepted at any post office.
See index of Post-Agency «ROSPECHAT». Number of subscription is 25257.