

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-2\(25\)-66-76](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-2(25)-66-76)
УДК 624.042.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СНЕГОВЫХ НАГРУЗОК

EXPERIMENTAL RESEARCHES FOR ASSIGNMENT OF SNOW LOADS DESIGN PARAMETERS

И. В. ЛЕБЕДЕВА, канд. техн. наук
А. В. МАСЛОВ
М. М. БЕРЕЗИН

Представлен общий анализ применения метода модельных испытаний в аэродинамических трубах для установления расчетных параметров снеговых нагрузок. Приведены базовые предпосылки и требования, необходимые для моделирования снегопереноса по покрытиям новых форм. Установлены общие принципы перехода от экспериментальных схем распределения снеговых нагрузок по покрытию при различных направлениях действия ветрового потока к назначению численных значений коэффициента формы μ . В качестве примера приведены результаты моделирования снегопереноса по покрытию стадиона.

The general analysis of a model test method in a wind tunnel applied for determining snow loads design parameters is presented. Basic conditions and requirements are given for modelling a snowdrift on the roofs of new forms. The general principles of conversion from the experimental schemes of snow load distribution on the roofs by the wind action in different directions to the assignment of numerical values of the form coefficient μ are established. As an example, the results of modelling a snowdrift on the roof of the stadium are presented.

Ключевые слова:

Аэродинамическая труба, здание, моделирование, покрытие, снеговые нагрузки, снегоперенос

Key words:

Building, modelling, roof, snow loads, snow drift, wind tunnel

Введение

В соответствии с п. 10.4 СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» (с Изм. №1 и №2) схемы распределения снеговой нагрузки по покрытиям зданий и сооружений и значения коэффициента μ устанавливаются в рекомендациях, разработанных

на основе результатов модельных испытаний в аэродинамических трубах. Это требование предназначено для покрытий новых форм при необходимости учета различных направлений переноса снега по покрытию и в других случаях, не указанных в действующих нормативных документах. Однако методика моделирования снеговых нагрузок в аэродинамических трубах предполагает установление лишь качественной картины снегоотложений на покрытии при различных направлениях снегопереноса, с учетом зданий окружающей застройки, и не позволяет получить численные значения снеговой нагрузки. Кроме того, экспериментальное моделирование не предусматривает учет последовательного накопления снегоотложений в течение зимнего периода, которое происходит за серию снегопадов при различных направлениях ветра, а также той доли снега, которая выпадает в безветренную погоду. Модельный материал, используемый при проведении испытаний, не обладает свойствами кристаллизации и сцепления, которыми обладает реальный снег, который уже выпал на покрытие. Нет возможности также экспериментально оценить сползание кристаллизованных масс снега в периоды оттепелей и в весенний период.

Процесс накопления снегоотложений на покрытиях зданиях в зимний период имеет очень сложную физическую природу, которую необходимо учитывать косвенным путем. Поэтому при разработке рекомендаций по назначению расчетных снеговых нагрузок на основе результатов модельных испытаний в аэродинамических трубах должны быть разработаны методы и способы перехода от полученных качественных распределений снегоотложений по покрытию к численным характеристикам снеговой нагрузки и значениям коэффициента формы μ .

В настоящей статье рассматриваются некоторые базовые подходы к решению этой проблемы. Кроме того, приведены примеры разработки рекомендаций по назначению расчетных снеговых нагрузок на основе моделирования и испытаний в аэродинамических трубах для сооружений новых форм.

1. Исходные предпосылки моделирования снеговой нагрузки в аэродинамических трубах

Испытания в аэродинамических трубах предназначены для оценки переноса снега по покрытиям различных форм под действием ветрового потока и учитывают формирование неравномерной картины снегоотложений при различных его направлениях.

В сочетании с расчетом объемов снегопереноса и сопоставления с известными условиями формирования снеговых нагрузок разработанная методика позволяет уточнить интенсивность неравномерных снегоотложений на покрытиях новых форм.

При моделировании снеговой нагрузки в аэродинамических трубах должны быть соблюдены некоторые базовые предпосылки и требования:

1. Используется аэродинамическая труба закрытого, метеорологического типа, с длинной рабочей частью, реализующая пристеночную турбулентность, аналогичную натурным условиям, при малых скоростях ветрового потока (1,5 - 6 м/с).

2. При моделировании учитывается тип местности (А или В). Для открытой местности (тип А) поверхность рабочей части аэродинамической трубы гладкая. Для местности, защищенной объектами городской застройки или иными препятствиями высотой более 10 м (тип В), в сечении трубы устанавливаются равномерно распределенные препятствия, имитиру-

ющие окружающую застройку и усиливающие турбулентный характер ветрового потока.

3. Размеры модели, размещаемой в сечении аэродинамической трубы на рабочем столе, подбираются таким образом, чтобы не допустить искажения стенками трубы характера её обтекания ветровым потоком. Для объектов сложных форм моделирование выполняется с помощью 3D-принтеров на основе архитектурных чертежей объекта, предоставленных проектировщиком. Внимание должно уделяться также характеру шероховатости модели, который должен быть подобен натурному объекту.

4. Расчет скорости ветра выполняется на уровне кровли модели испытываемого объекта.

5. Модель ориентируется по сторонам света и соотносится с топологией местности (на основе ситуационного плана или генплана проектируемого сооружения). Возможен различный тип местности при различных направлениях ветрового потока.

6. На поверхность модели перед началом испытаний наносится тонкий слой имитатора снега, соответствующий по характеру переноса натурному снегу. Как правило, используется древесная мука определенной влажности и размеров частиц, специально подобранная на основе сопоставления с известным характером перераспределения снега под действием ветра на покрытиях простых форм.

7. Продувка выполняется при малых скоростях ветрового потока, ступенчато возрастающих примерно от 1,5 – 2 до 4 – 5 м/с, при шаге по скорости 0,3 – 0,5 м/с, до образования характерной картины снегоотложений на покрытии модели. На каждом шаге по скорости ветра производится выдержка до стабилизации отложений. Полученная картина снегоотложений на каждой ступени по скоростям регистрируется с помощью фото- и видеоаппаратуры.

8. Испытания проводятся по круговой панораме с заданным шагом, выбираемым с учетом геометрической формы модели и типа местности со стороны действия ветрового потока. Тип местности при различных направлениях может быть разным. При каждом направлении испытаний порядок действий повторяется.

9. В результате проведения испытаний формируются схемы распределения снеговой нагрузки по покрытию при каждом направлении ветрового потока, которые впоследствии должны быть использованы при разработке соответствующих рекомендаций.

2. Общие принципы перехода от качественных схем распределения снеговых нагрузок по покрытию к назначению численных значений коэффициента формы μ

Рекомендации по назначению схем снеговых нагрузок и значений коэффициента формы μ разрабатываются, исходя не только из результатов проведенных экспериментальных исследований, но и с учетом общих закономерностей формирования снегоотложений на покрытиях зданий в зимний период. При этом необходимо учитывать следующие факторы.

1. Доля переносимого по покрытию снега составляет, как правило, от 10 до 70% от общего объема снега, выпадающего в зимний период, и меняется от зимы к зиме. Поэтому доля равномерно распределенной нагрузки должна быть добавлена к распределению модельного материала, полученному при испытаниях в результате переноса ветровым потоком.

В целях получения наиболее неблагоприятной картины неравномерных снегоотложе-

ний, учитываемой в расчетах несущих конструкций, доля переносимого по покрытию снега, как правило, принимается в среднем 40%, однако для объектов сложной конфигурации допускается учет расчетных ситуаций с иным соотношением доли снега, сохраняющейся на покрытии и переносимой под действием ветрового потока.

2. Формирование снегового покрова на покрытиях зданий происходит постепенно и послойно. Каждый слой снега может иметь различную толщину и плотность, и формируется при различных направлениях снеговетрового потока. В течение 1-3 суток происходит кристаллизация свежевывавшего снега, и после завершения этого процесса его перенос ветром, как правило, уже не происходит. Некоторые направления ветра при снегопадах бывают преобладающими для конкретных населенных пунктов, но могут меняться от зимы к зиме.

Поэтому при задании схем неравномерного распределения снеговой нагрузки по покрытию на основе модельных испытаний следует оценить влияние снегопереноса по каждому направлению и составить их сочетания для указанных направлений, наиболее неблагоприятные в расчетах строительных конструкций. При этом могут быть учтены как отдельные направления, так и их комбинации, при которых каждое учитываемое направление принимается со своим весовым коэффициентом. Например, 20% — южное направление, 40% — юго-западное направление и 40% — равномерно распределенная нагрузка.

3. При обработке результатов испытаний могут быть использованы не только окончательные результаты испытаний, но и данные для промежуточных ступеней скоростей, при которых была получена наиболее характерная картина снегоотложений. Выбор необходимых данных для обработки производится после завершения всего эксперимента.

4. При назначении схем неравномерно распределенных снеговых нагрузок на покрытие необходимо учесть *наиболее невыгодную ориентацию* сооружения по отношению к направлению ветрового потока, дающую наибольшие величины добавочных снегоотложений на различных частях покрытия.

Результатом проведения модельных испытаний должны стать избранные наиболее неблагоприятные *обобщенные* схемы распределения снеговых нагрузок по покрытию с учетом различных комбинаций снеговетровых потоков. На их основе путем расчета возможных объемов снегопереноса определяются численные значения коэффициентов формы μ .

При определении численных значений коэффициентов формы μ для неравномерно распределенных снеговых нагрузок учитываются следующие принципы:

- при отсутствии на покрытии парапетов, ограждений и перепадов высот значение коэффициента μ , осредненное по площади покрытия для каждого варианта нагружения в проекции на горизонтальную поверхность, как правило, не должно превышать 1,0 (для покрытий сложной геометрической формы, при характерных размерах в плане более 100 м принимается не более 1,2);

- опыт эксплуатации уникальных и большепролетных зданий и сооружений показывает, что для гладких поверхностей типа оболочек максимальные значения коэффициента μ в пониженных зонах образования «снеговых мешков», как правило, не превышают 3,0 и форма изменения плотности снегоотложений не имеет резких уступов. Для плоских поверхностей больших размеров вне зоны парапетов, при отсутствии фонарей или иных надстроек локальная неравномерность снегоотложений, по нашим данным, не превышает

максимальных значений коэффициента $\mu = 1,5$;

- при наличии перепадов высот и парапетов максимальные численные значения коэффициента формы μ принимаются с учетом пунктов Б.8 и Б.13 приложения Б СП 20.13330.2016. Размеры и форма областей повышенных снегоотложений могут быть уточнены на основе результатов модельных испытаний;

- число рассматриваемых схем неравномерно распределенных снеговых нагрузок для проведения расчетов определяется геометрией покрытия здания или сооружения и должно включать все возможные неблагоприятные распределения снеговой нагрузки по покрытию при различных направлениях ветрового потока;

- при поверочных расчетах несущих конструкций следует учесть также направления, соответствующие преобладающим направлениям зимних ветров для места строительства. Соответствующие схемы могут учитываться как основные варианты при проведении расчетов строительных конструкций или как дополнительные.

3. Экспериментальные исследования снеговых нагрузок на модели большепролетного покрытия стадиона

Методика экспериментального определения основных закономерностей снегопереноса и образования снегоотложений на поверхности покрытий отражена в ряде публикаций [1 – 3], и основные требования к ней уже изложены ранее.

Рассмотрим процесс исследования условий снегоотложений на модели стадиона (рис. 1) в аэродинамической трубе компании «УНИКОН» (г. Новосибирск). Испытания модели были проведены с шагом $22,5^\circ$. Поскольку покрытие симметрично относительно главных центральных осей, при проведении испытаний рассматривалась только одна четверть направлений ветрового потока.

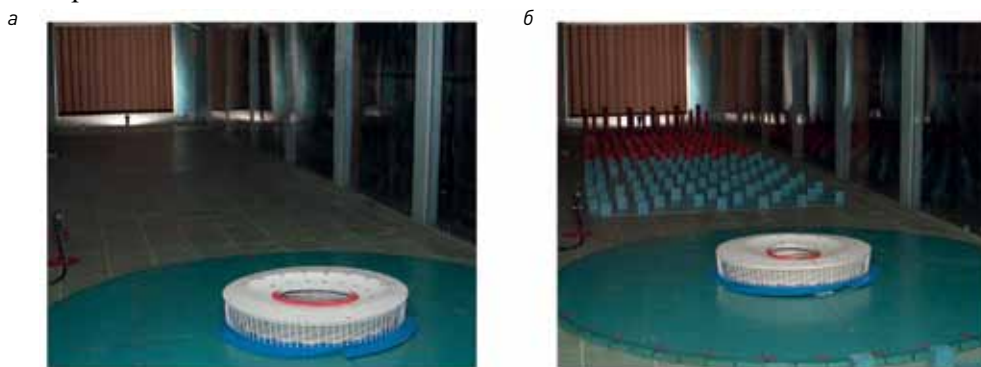


Рис.1. Модель стадиона в аэродинамической трубе компании «Уникон», г. Новосибирск:
а — тип местности «А»; б — тип местности «В»

Далее приводятся результаты испытаний, а также рекомендуемые для расчета несущих конструкций схемы распределения снеговых нагрузок и значения коэффициентов μ .

Для выполнения поверочных расчетов несущих конструкций ориентация модели по отношению к направлениям «ветра» должна приниматься с учетом наиболее вероятных снеговетровых потоков в зимнее время, которые могут быть определены следующим образом.

Для площадки размещения сооружения в районе Н. Новгорода, по данным ближайшей метеорологической станции, распределение направлений ветров в зимний период (вторая

половина ноября — первая половина марта) достаточно неравномерно. Преобладающими являются ветры юго-западного, южного, западного и юго-восточного направлений. Основные объемы переноса снега при этих направлениях составляют: ЮЗ (27%), Ю (18%), З (14%) и ЮВ (12%). На долю указанных направлений приходится 71% всего объема снеготранспорта.

На рис. 2 показана модель с нанесенным модельным материалом (древесной мукой) до проведения испытаний в аэродинамической трубе компании «УНИКОН» с целью определения характера снегоотложений на покрытия под действием ветрового потока.

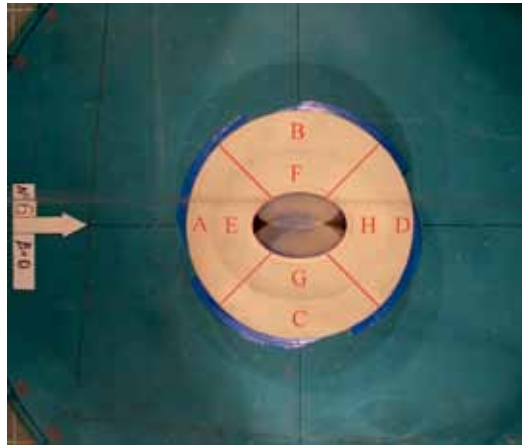


Рис.2. Модель стадиона до проведения испытаний

Для описания результатов продувки участки покрытия различной ориентации разбиты на участки, которые обозначены буквами *A – D* — для стационарной части кровли и *E – H* — для навеса над трибунами.

Испытания проводились для двух типов местности: открытой (тип *A*) и защищенной объектами городской застройки или иными препятствиями высотой более 10 м (тип *B*).

В результате проведения испытаний выявлены места максимального накопления снегоотложений, их частичного сохранения, а также зоны, свободные от «снега».

В качестве начального ($\beta = 0^\circ$) было избрано направление ветрового потока с севера, вдоль большей оси футбольного поля.

Расчет скорости ветра выполнен на уровне кровли стадиона. Скорость измерена в сечении $X = 9$ м на высоте $Z = 120$ мм. Модель установлена в сечении аэродинамической трубы $X = 10,2$ м.

На последующих фото показана модель с нанесенным модельным материалом (древесной мукой) во время и после проведения испытаний. Стрелками на фото показано направление действия ветрового потока.

Начальная скорость ветрового потока в аэродинамической трубе при начале переноса модельного материала составила для типа местности *A* 2,2 м/с, для типа местности *B* — 2,3 м/с. Максимальная скорость ветрового потока, при которой наблюдалась характерная картина снегоотложений, при различных направлениях продувки измерена в диапазоне: для типа местности *A* — от 3,4 до 3,8 м/с, для типа местности *B* — от 3,2 до 3,4 м/с.

В результате проведенных испытаний выявлена весьма сложная и неравномерная картина снегоотложений на покрытии сооружения, зависящая от направления снеговетровых потоков. Установлены зоны повышенных снегоотложений различной плотности, а также области, свободные от «снега».

Все испытания были проведены в двух вариантах: для типов местности «А» и «В», для пяти направлений ветрового потока, из которых в настоящей статье приводятся три основных направления. Другие направления ветрового потока рассматривались как дополнительные при задании схем снеговых нагрузок на покрытие.

Первая продувка модели проводилась вдоль главной продольной оси сооружения при направлении ветра с севера ($\beta = 0^\circ$) (рис. 3).

На фото 3.1 и 3.3 показаны картины снегоотложений на покрытии модели при относительно малых скоростях ветрового потока, на фото 3.2 и 3.4 — при более высоких скоростях, при которых испытания были завершены.

Аналогичная картина снегоотложений, симметричная относительно главной центральной оси, будет иметь место при южном направлении ветра.

Направление ветра вдоль главной продольной оси сооружения является одним из преобладающих в зимний период для района строительства и относится к наиболее неблагоприятным направлениям. Поэтому это направление было учтено в качестве одного из основных расчетных случаев при задании снеговой нагрузки на покрытие.

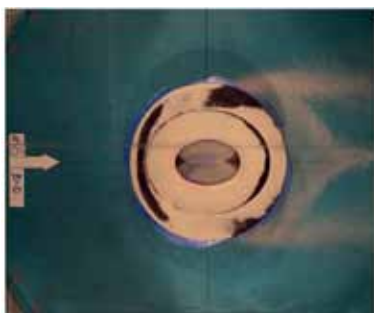


Фото 3.1

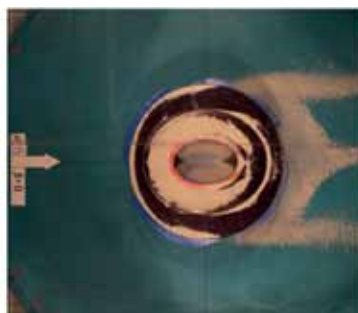


Фото 3.2

$\beta = 0^\circ$. Тип местности А

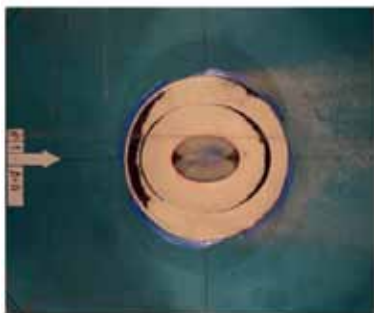


Фото 3.3

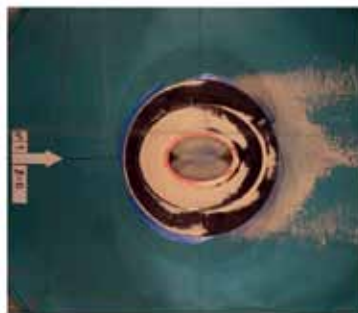


Фото 3.4

$\beta = 0^\circ$. Тип местности В

Рис.3. Результаты продувки при направлении ветрового потока $\beta = 0^\circ$

Третья продувка модели проводилась при направлении ветра с северо-востока ($\beta = 45^\circ$) (рис. 4).

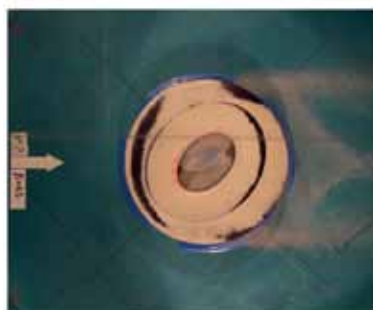


Фото 4.1



Фото 4.2

$\beta = 45^\circ$. Тип местности А

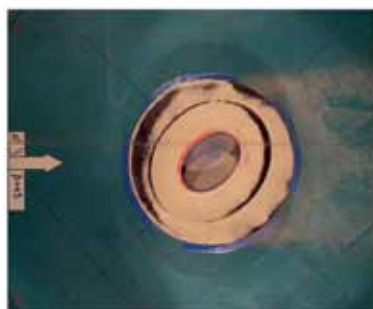


Фото 4.3

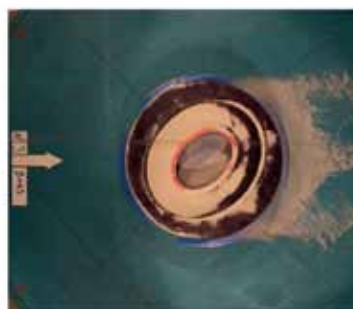


Фото 4.4

$\beta = 45^\circ$. Тип местности В

Рис.4. Результаты продувки при направлении ветрового потока $\beta = 45^\circ$

Различие между типами местности А и В выявлено при продувках и проявилось в скорости перераспределения модельного материала, которая для типа местности А несколько выше. Однако конечная картина распределения снега по покрытию практически идентична. Аналогичная картина снегоотложений будет иметь место при юго-восточном, юго-западном и северо-западном направлениях ветра.

Указанные направления ветра относятся к преобладающим в зимний период для района строительства и являются неблагоприятными при расчете несущих конструкций, поэтому они были учтены в качестве одного из основных расчетных случаев при задании неравномерно распределенной снеговой нагрузки на покрытие.

Пятая продувка модели проводилась при восточном направлении ветра, ($\beta = 90^\circ$) (рис. 5).

Динамический характер перераспределения модельного материала под действием турбулентного ветрового потока наиболее ярко выражен в верхней части основного покрытия как с наветренной, так и с подветренной стороны, тогда как пониженная часть навеса над трибунами имеет тенденцию к сохранению и накоплению добавочных снегоотложений.

Аналогичная картина снегоотложений, симметричная относительно главной центральной оси, будет иметь место при западном направлении ветра.

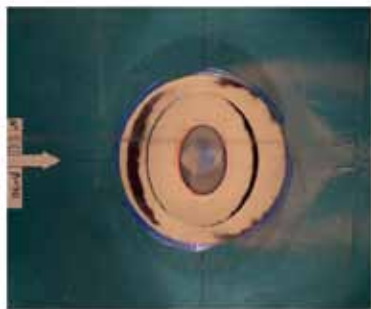


Фото 5.1

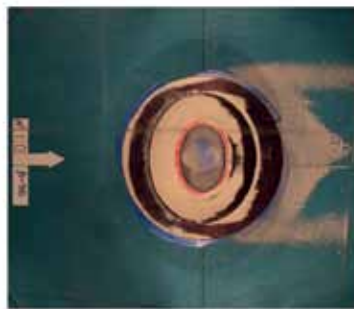


Фото 5.2

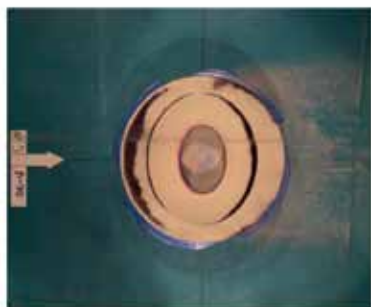
 $\beta = 90^\circ$. Тип местности А

Фото 5.3

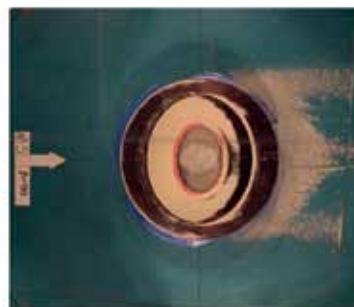


Фото 5.4

 $\beta = 90^\circ$. Тип местности В**Рис.5.** Результаты продувки при направлении ветрового потока $\beta = 90^\circ$

Это направление ветра относится к преобладающим в зимний период для района строительства и является одним из наиболее неблагоприятных при расчете несущих конструкций. Поэтому оно было учтено в качестве одного из основных расчетных случаев при задании неравномерно распределенной снеговой нагрузки на покрытие совместно с предыдущим направлением.

В целом проведенные модельные аэродинамические испытания показали сложную и неравномерную картину распределения снеговых нагрузок по покрытию стадиона. Характер возникающих отложений снега на покрытии, соответствующие схемы распределения снеговых нагрузок и коэффициенты μ , принимаемые в расчетах несущих строительных конструкций, главным образом зависят от преобладающих направлений ветра в зимний период, а также от объемов снеготранспорта и могут меняться от зимы к зиме.

Для условий места строительства распределение зимних ветров по направлениям достаточно неравномерное. В связи с этим при расчете строительных конструкций рекомендуется рассматривать, помимо равномерно распределенных снеговых нагрузок на покрытие, основные возможные неблагоприятные схемы неравномерных распределений снега по покрытию с учетом предполагаемых зон образования «снеговых мешков». Испытания показали в целом сходный характер снеготложений на покрытии при типах местности А и В, с той разницей что для типа местности А снос модельного материала с верхней части

основного покрытия происходит при более низких скоростях ветрового потока, чем для типа местности В.

При сравнении результатов модельных аэродинамических испытаний с преобладающими направлениями зимних ветров для места строительства можно заключить, что наибольшее накопление снега на рассматриваемом покрытии будет происходить при ветрах юго-западного, южного, западного и юго-восточного направлений. Возможные наиболее неблагоприятные схемы неравномерно распределенных снеговых нагрузок на рассматриваемое покрытие, полученные по данным проведенных аэродинамических испытаний, были положены в основу разработки соответствующих рекомендаций.

Пример разработки схем снеговых нагрузок и коэффициентов μ по данным проведенных испытаний для стадиона показан на рис. 6. Следует отметить, что во всех случаях необходимо учитывать также схему равномерно распределенных снеговых нагрузок по покрытию.

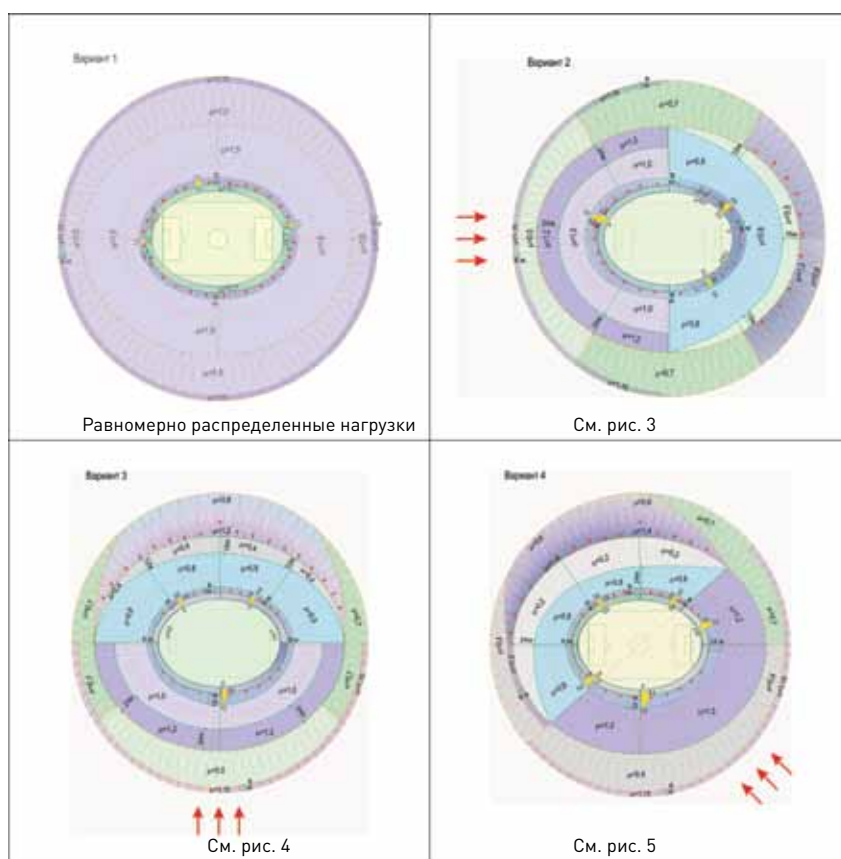


Рис.6. Схемы снеговых нагрузок на покрытие стадиона, полученные по данным проведенных модельных аэродинамических испытаний

Библиографический список

1. Лебедева И.В., Некрасов И.В., Меснянкин С.Ю. Экспериментальные исследования снегоотложений на большепролетных покрытиях сложных форм. // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. №2. С. 76-84.

2. Попов Н.А., Лебедева И.В., Богачев Д.С., Березин М.М. Воздействие ветровых и снеговых нагрузок на большепролетные покрытия. // Промышленное и гражданское строительство. 2016. №12. С. 71-76.

3. Чуринов П.С., Грибачев Ю.С. Экспериментальное исследование ветрового и снегового воздействия на проектируемый аэропортовый комплекс. // Промышленное и гражданское строительство. 2016. №11. С. 24-27.

Авторы:

Ирина Владимировна ЛЕБЕДЕВА, канд. техн. наук, заместитель заведующего лабораторией надежности сооружений ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Irina LEBEDEVA, Ph.D. (Engineering), Duty head of Structure Reliability Department, TSNIISK named after V.A. Koucherenko JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: ilebedeva61@gmail.com

тел.: +7 (916) 561-23-72

Александр Владимирович МАСЛОВ, вед. науч. сотрудник, ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Alexander MASLOV, Lead Scientist Researcher, TSNIISK named after V.A. Koucherenko JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: lns.maslov@gmail.com

тел.: +7 (499) 174-77-95

Максим Михайлович БЕРЕЗИН, начальник Новосибирского отдела аэродинамики сооружений, Научно-исследовательская и проектно-строительная «Фирма «УНИКОН», Кемерово

Maksim BEREZIN, Head of the Novosibirsk Department of Structural Aerodynamics, Research and design and construction "Firm "UNICON", Kemerovo

e-mail: m-berezin@bk.ru

тел.: +7 (913) 929-13-97