1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ОБЩИЕ ДАННЫЕ

В настоящем разделе в концентрированной форме изложены современные представления о влиянии реологических процессов на напряженно - деформированное состояние грунтовых оснований и возведенных на них зданий и сооружений. Он появился по просьбе ознакомившихся с первой редакцией настоящей монографии проектировщиков - практиков и ученых - исследователей, которые являются узкими специалистами в области расчета и проектирования строительных конструкций, оснований и фундаментов в рамках моделей упругой, пластичной, упругопластичной сред. При его написании преследовались такие цели.

1. Освежить в памяти читателя сведения о теории консолидации (в том числе фильтрационной) грунтовых оснований и напомнить ему о принятой в этой области механики грунтов терминологии.

2. Определить место теории взаимосвязанной фильтрационной консолидации в ряду практических и теоретических задач и проблем современных механики грунтов и фундаментостроения.

В качестве иллюстрации к сказанному напомним, что, например, принятый в одном из вариантов теории пластичности термин **“теория пластического течения”** - это абсолютно не то же самое, что **“течение вязкой жидкости”** или **“ползучесть грунта”**, поскольку в первом случае в уравнении (или уравнениях) состояния полностью отсутствует время.

1.1 РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ. ИХ ВЛИЯНИЕ НА СОСТОЯНИЕ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ И РАСПОЛОЖЕННЫХ НА НИХ КОНСТРУКЦИЙ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

В литературе имеется значительное количество работ, в которых исследован процесс изменения напряженно- деформированного состояния (вплоть до разрушения) зданий и сооружений вследствие протекающих в их грунтовых основаниях **реологических процессов** (т.е. в результате **фильтрационной консолидации грунта и его ползучести**).

Так, выполненные Р. Пеком в США обследования большого числа подпорных стен позволили сделать вывод о том, что 18% из них в результате ползучести полностью разрушились, 53% конструкций находятся в состоянии прогрессирующего смещения и только в основании 11% конструкций деформации практически полностью стабилизировались [25].

Известны также многочисленные случаи многолетних деформаций конструкций виадуков железнодорожных и пешеходных мостов [25, 112].

Длительные деформации гражданских и промышленных зданий описаны авторами [1, 2, 3, 10, 11, 12, 42, 61, 88, 89, 90, 91, 92, 105, 108, 112, 114, 159, 160, 161]. Из этих зданий наиболее известными являются Пизанская башня в Италии и Исаакиевский собор в г. Санкт-Петербурге.

Авторами [42] приведен пример длительных деформаций 9 - этажного дома в г. Запорожье, осадки которого за 2 месяца достигли 417 мм. В результате проявления реологических процессов в здании возникли значительные повреждения. Аналогичный случай описан автором [8], который выполнял обследование 5- этажного дома в Казани.

Авторами [47, 114] описан ряд случаев повреждений зданий, построенных на слабых грунтах, вследствие ползучести основания. В данном случае после завершения строительства было реализовано 30…40% осадок, а в результате проявления фильтрационной консолидации и ползучести здания получили значительные повреждения.

Дальнейший анализ литературных источников позволил нам сделать вывод о том, что после приложения 90%…100% нагрузки в процессе эксплуатации зданий, сооружений и конструкций на грунтовом основании осадки их фундаментов могут возрастать на 100 … 350 % [1, 2, 3, 10, 11, 12, 17, 18, 19, 28, 45, 46, 48, 49, 53, 56, 57, 58, 59, 61, 88, 89, 90, 101, 102, 108]. При этом усилия в элементах надфундаментной конструкции на интервале времен $0 < t < \infty$ могут превышать их значения в стабилизированном состоянии в 2 раза и более [28].

Представляют интерес экспериментальные данные, полученные авторами [96, 97, 120, 166] в ходе длительных испытаний на ползучесть грунтовых образцов. Оказалось, что при постоянной во времени действующей на образцы нагрузке кривые их деформирования вначале могут иметь затухающий характер (при этом скорость деформирования убывает), после чего ползучесть становится прогрессирующей и происходит разрушение грунта.

Таким образом, проблема учета влияния реологических свойств грунтовых оснований на напряженно-деформированное состояние системы “основание-фундамент (или фундаменты) - сооружение” является весьма актуальной как при расчете по деформациям, так и при определении их прочности и устойчивости.

Далее рассмотрим факторы, влияющие на деформации, прочность и устойчивость системы “основание - фундамент (или фундаменты) - основание”. Согласно существующим в настоящее время представлениям о совместной работе оснований и возведенных на них зданий и сооружений этими факторами являются [28, 136, 137, 139]:

- геометрия надфундаментного строения;

- жесткостные и прочностные характеристики его элементов (в принципе, несущие элементы зданий и сооружений обычно выполняются из разнородных материалов, прочность и деформационные свойства которых могут различаться в десятки, а иногда и в сотни раз);

- тип, конструкция и геометрия фундаментов;
- их жесткостные и прочностные свойства;
- текстурные особенности грунтовой толщи;
- свойства грунтовых слоев (в том числе реологические).

Поскольку свойства грунтовых оснований в значительной мере определяются их строением, рассмотрим этот вопрос подробнее.

Основными особенностями грунтовых толщ являются разнообразие их минерального состава, многофазность и различный генезис (т.е. история происхождения и формирования). Поэтому свойства грунтов в зависимости от перечисленных факторов могут существенно различаться [25, 29, 33, 34, 45, 65, 66, 93, 94, 121, 122, 125, 127, 128, 131, 132, 167].

Согласно [24, 25, 27, 33,…,37, 45, 65, 66, 67, 85, 93] уплотнение грунтов под нагрузкой в общем случае сопровождается такими процессами:

- деформацией минеральных частиц скелета и цементационных связей;
- разрушением цементационных связей;
- образованием новых цементационных связей;
- деформацией водно-коллоидных связей (обычно эти деформации реализуются во времени);
- разрушением водно-коллоидных связей;
- образованием новых водно-коллоидных связей;
- отжатием находящейся в порах грунта воды (процесс фильтрационной консолидации);
- увеличением объема пор грунта при нагнетании в него поровой жидкости (процесс фильтрационной реконсолидации).

Кроме того, существуют также особые виды грунтов, которые обладают такими специфическими свойствами, как:

- анизотропия свойств;
- просадка;
- суффозия;
- усадка при высыхании;
- подъем при увлажнении и т.д.

Таким образом, при уплотнении грунтовых оснований мы сталкиваемся с деформацией слагающих их частиц, межчастичных связей, явлениями фильтрационной консолидации и реконсолидации, разрушением старых и образованием новых межчастичных связей.

Процессы деформирования водно - коллоидных связей, их разрушения, восстановления и отжатия жидкости из пор грунта протекают во времени. При этом их скорость зависит от величины действующей на основание нагрузки, времени ее действия, а также характера ее изменения во времени. Необходимо также отметить, что, например, в песчаных грунтах связи между частицами отсутствуют.

Согласно данным [25, 65, 66], общие деформации грунтовых оснований в общем случае включают в себя упругую составляющую и изменяющуюся во времени компоненту.

При этом известно, что протекающие во времени в грунтовом основании процессы трансформации их напряженно - деформированного состояния обусловлены такими основными процессами:

- фильтрационной консолидацией;
- ползучестью грунтового скелета;
- перераспределением (в том числе, релаксацией) напряжений.

Согласно современным представлениям**, процесс фильтрационной**

консолидации обусловлен миграцией поровой жидкости в грунтовом основании под воздействием **градиента порового давления.** При этом предполагается, что взаимосвязь между скоростью фильтрации и градиентом порового давления подчиняется **закону Дарси.**

Ползучесть грунтового скелета является специфическим свойством грунта, которое проявляется при воздействии на основание нагрузки. В механике грунтов под ползучестью принято понимать непрерывное накопление во времени деформаций при воздействии на основание постоянной во времени нагрузки. Общий вид схематической кривой ползучести представлен на рис. 1.1.1.

По аналогии с деформированием грунтов в рамках упругой среды принято различать **объемную и сдвиговую ползучесть**.

Также различают:

- **затухающую ползучесть** (такую ползучесть, при которой при неограниченном возрастании времени деформации стремятся к некоторому пределу, а скорость ползучести стремится к нулю);
- **вековую ползучесть** (такую ползучесть, при которой с течением времени деформации неограниченно возрастают, причем скорость деформации при неограниченном возрастании времени стремится к нулю);
- **ползучесть с постоянной скоростью**;
- **прогрессирующую ползучесть** с возрастающей с течением времени скоростью.

Кроме того, деформации грунтовых оснований при загрузке - разгрузке подразделяют на:

- полностью обратимые, восстанавливающиеся мгновенно **(т.е. упругие);**

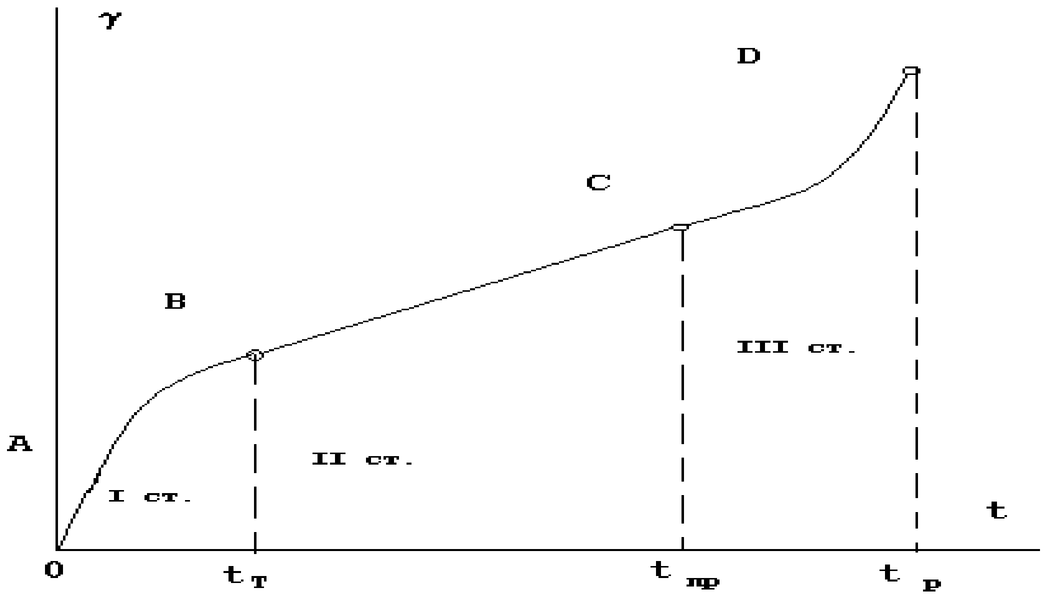

Рис.1.1.1. Кривая ползучести грунта (схема). I ст. - затухающая ползучесть; II ст. - то же с постоянной скоростью; III ст. - прогрессирующая ползучесть. На участке АВ - показана ползучесть с затухающей скоростью, на участке ВС - показана ползучесть с постоянной скоростью, на участке СД - показана ползучесть с возрастающей скоростью

- запаздывающие во времени полностью обратимые **(вязкие);**
- полностью необратимые **(т.е. пластические).**

При этом известно, что пластические деформации оснований могут проявляться как **мгновенно, так и накапливаться во времени**.

В заключение отметим, что под **релаксацией** (т.е. расслаблением) напряжений в механике грунтов понимают уменьшение во времени напряжений при постоянной относительной деформации грунтового образца.

Из изложенного выше вытекает, что основания обладают большим количеством свойств, которые обусловлены их генезисом, структурой и текстурой. Поэтому для расчета грунтовых оснований предложено значительное количество моделей, которые в той или иной мере полно отражают те или иные их свойства (см. раздел 1.2).

Кроме того, необходимо отметить, что проблема учета реологических свойств грунта при проектировании оснований и расположенных на них зданий и сооружений весьма актуальна и нуждается в своем решении. Это подтверждается тем, что в настоящее время за осадками и кренами ответственных сооружений в обязательном порядке выполняются специальные геодезические и иные наблюдения [107, 113, 115].

1.2. ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ И РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ГРУНТОВЫХ НЕВОДОНАСЫЩЕННЫХ ОСНОВАНИЙ

Модели грунтовых оснований можно разбить на две большие группы:

- модели, позволяющие прогнозировать поведение грунта на микроуровне (**дискретные модели**) [77, 130];

- модели сплошной среды [30, 31, 36, 37, 38, 39, 40, 45, 66, 68, 125, 127, 128, 132, 167].

Дискретные модели получили незначительное распространение в инженерной практике, поскольку для их реализации необходимо выполнить большой объем вычислительной работы и сбора исходной информации [77, 130]. Поэтому в дальнейшем эта группа моделей грунтового основания рассматриваться нами не будет.

Модели, интерпретирующие основание как сплошную среду, условно можно разбить на три больших группы:

- модели, описывающие только лишь процесс разрушения грунта [117, 125];

- модели, описывающие только лишь процесс деформирования грунта [125, 127, 128];

- комбинированные модели, которые одновременно описывают процессы деформирования и разрушения грунта [125].

В дальнейшем первая и третья группы моделей рассматриваться не будут, поскольку в соответствии с действующими в настоящее время нормативными документами нагрузки на основания фундаментов значительно меньше разрушающих. Кроме того, при реализации моделей грунтовых оснований третьей группы для практических расчетов имеет место проблема получения необходимых для их реализации исходных данных (т.е. отсутствие ГОСТов, ОСТов ТУ и узаконенных методик, позволяющих определять значения входящих в них материальных констант).

Модели грунта второй группы также можно разбить на две большие подгруппы:

- модели линейной среды;
- модели нелинейной среды.

Поскольку при использовании для практических расчетов нелинейных моделей имеет место проблема определения входящих в них материальных констант (отсутствуют соответствующие ГОСТы, ОСТы и ТУ), в дальнейшем нами будут проанализированы только лишь линейные модели грунта. Эти модели используются в настоящее время в инженерной практике и действующих в настоящее время нормативных документах [51].

Линейные модели можно разбить на такие группы.

1. Модели, описывающие **упругие** свойства грунта.
2. Модели, описывающие **упруговязкие** свойства грунта.
3. Модели, описывающие **упругопластические** свойства грунта.
4. Модели, описывающие **упруговязкопластические** свойства грунта.

Из упругих моделей наибольшее распространение получили [15, 21, 29, 30, 31, 36, 37, 41, 60, 104, 106, 121, 122, 123, 125, 127, 128]:

- модель Винклера - Фусса (коэффициента постели);
- модель коэффициента жесткости;
- модель Пастернака;
- модель Вигхарта;
- модель Б. Г. Штаермана;
- модель упругой изотропной среды;
- модель упругой анизотропной среды.

Модель основания Винклера - Фусса широко используется для практических расчетов конструкций на грунтовом основании. В ее основу положено **уравнение состояния** вида

$$P = C_Z \cdot S\,, \tag{1.2.1}$$

где P - среднее давление под подошвой фундамента; S - его средняя осадка; C_Z - **коэффициент постели основания**.

Равенство (1.2.1) допускает естественное обобщение на случай неравномерных распределений осадок и давлений под подошвой фундамента. В этом случае оно имеет вид:

$$P(x,y)=C_Z \cdot S(x,y), \tag{1.2.2}$$

где $P(x,y)$ - давление в точке с координатами (x,y); $S(x,y)$ - ее осадка; C_Z - **коэффициент постели основания.**

Основным достоинством модели Винклера - Фусса является ее простота, а недостатком - невозможность учета распределительной способности и текстурных особенностей основания. При этом существует ряд модификаций этой модели, которые в интегральной форме позволяют учитывать неоднородность свойств оснований в плане и по глубине.

Наиболее распространенной модификацией модели Винклера - Фусса является **модель переменного коэффициента жесткости** [78, 79, 80, 100]. Эта модель грунтового основания нашла широкое применение при расчете напряженно - деформированного состояния конструкций на основании, сложенном лессовыми просадочными грунтами. Ее отличием от модели Винклера - Фусса является то, что в данном случае коэффициент постели - это переменная величина, которая зависит от координаты, в которой определяется осадка основания, т.е.:

$$P(x,y)=C_Z(x,y)\cdot S(x,y), \tag{1.2.3}$$

где $P(x,y)$ - давление некоторой в точке дневной поверхности основания с координатами (x,y); $S(x,y)$ - ее осадка; $C_Z(x,y)$- **коэффициент жесткости основания**.

На начальном этапе эта модель использовалась для расчетов конструкций на основании, сложенном лессовыми просадочными грунтами. При этом коэффициент жесткости (т.е. переменный коэффициент постели) определялся экспериментально. В дальнейшем появились методы расчета, в рамках которых коэффициент жесткости определялся расчетным путем. Один из вариантов таких методов реализован в вычислительных комплексах “Лира”, “$Scad$” и “Мономах” [86, 98].

Модели грунтового основания **Пастернака и Вигхарта** являются дальнейшим развитием модели Винклера - Фусса. Основное их достоинство - возможность учета распределительной способности грунтовых оснований [41, 106]. При этом существуют модификации указанных моделей, позволяющие учитывать неоднородность свойств оснований в плане и по глубине. Обычно учет неоднородности выполняется в такой последовательности - вначале по формуле

$$C_1(x,y) = \frac{P(x,y)}{S(x,y)} \tag{1.2.4}$$

определяется коэффициент модели Пастернака $C_1(x,y)$, а затем - по формуле

$$C_2(x,y) = \frac{[1 - 2 \cdot \nu_o(x,y)]}{6 \cdot [1 - \nu_o(x,y)]} \cdot C_1(x,y) \cdot H_c^2 \tag{1.2.5}$$

- коэффициент жесткости $C_2(x,y)$. Здесь $P(x,y)$ - давление некоторой в точке дневной поверхности основания с координатами (x,y); $S(x,y)$ - ее осадка; $\nu_o(x,y)$ - средневзвешенное по глубине грунтовой толщи значение коэффициента Пуассона основания на интервале глубин $z \in (0,H_c)$; H_c - глубина сжимаемой толщи.

При выполнении практических расчетов в рамках данной модели обычно поступают так:

- с использованием алгоритма раздельного расчета [45, 51, 125] определяют напряжения под подошвой фундамента $P(x,y)$;
- далее по методике ДБН [51] рассчитывают осадки $S(x,y)$;
- затем определяют значения коэффициентов $C_1(x,y)$ и $C_2(x,y)$.

Авторами работ [147, 148, 154] показано, что при многократном уточнении коэффициентов жесткости $C_1(x,y)$ (т.е. при использовании процесса итерации) в рамках модели коэффициента жесткости можно получить результаты, практически полностью совпадающие с решениями теории упругости в рамках модели основания в виде **упругой линейной изотропной среды**.

В целом, анализ рассмотренных моделей грунтового основания позволил нам сделать такие выводы:

1. Их достоинствами являются:
- простота;
- положительный опыт использования при решении большого числа практических задач;
- реализация в современных вычислительных комплексах.

2. К недостаткам рассмотренных моделей следует отнести:
- невозможность детального учета текстурных особенностей строения грунтовой толщи по глубине основания;
- невозможность учета распределительных свойств грунтовых оснований (модель Винклера - Фусса);

В этой связи использование перечисленных моделей (по крайней мере, их классических вариантов) **принципиально не возможно для расчета деформаций водонасыщенных оснований**.

3. Существуют методы расчета, позволяющие с использованием указанных моделей получить результаты, совпадающие с результатами, полученными в рамках модели **упругой изотропной среды.**

Модель упругой изотропной среды получила наибольшее распространение при расчете напряженно-деформированного состояния грунтовых оснований [29, 30, 31, 41, 59, 123, 127, 128]. В этом случае уравнением состояния является **обобщенный закон Гука,** который в декартовой системе координат имеет вид:

$$\sigma_{xx} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_x + \lambda \cdot e;$$

$$\sigma_{yy} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_y + \lambda \cdot e;$$

$$\sigma_{zz} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e;$$

$$\tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy};$$

$$\tau_{xz} = G \cdot \gamma_{xz};$$

$$\tau_{yz} = G \cdot \gamma_{yz}. \qquad (1.2.6)$$

Здесь σ_{xx}, σ_{yy} и σ_{zz} - действующие в точке с координатами (x,y,z) нормальные напряжения; τ_{xy}, τ_{xz} и τ_{yz} - то же, касательные; λ и G - упругие константы Ламе [123]; ε_x, ε_y *и* ε_z - нормальные относительные деформации; e - объемная относительная деформация; γ_{xy}, γ_{xz} и γ_{yz} - деформации сдвига [123].

К недостаткам модели упругой линейной изотропной среды относят невозможность расчетов грунтовых оснований по прочности и завышенную распределительную способность основания [41].

Кроме того, известно, что при значительных размерах подошвы фундаментов осадки, рассчитанные в рамках модели упругой среды, значительно превышают их фактические значения [36, 41, 83]. При этом теоретические и фактические эпюры вертикальных и нормальных напряжений также существенно отличаются друг от друга.

Для решения практических задач в рамках модели упругой изотропной среды с целью устранения перечисленных недостатков используют такие методы [50, 51, 52, 53, 54, 55]:

- ограничение величин нагрузок, действующих на основание (в этом случае не происходит его разрушение, а диаграмма “осадка-нагрузка” имеет вид отрезка прямой);

- ограничение глубины сжимаемой толщи (таким образом достигается соответствие между расчетными и фактическими осадками большеразмерных фундаментов);

- ограничение размеров расчетной области основания в плане (таким образом занижаются его распределительные свойства).

В этой связи при расчете грунтовых оснований используют такие **расчетные схемы грунтовых оснований** [40, 125, 127, 128, 155]:

- **упругого полупространства** (эта схема обычно используется для расчета осадок фундаментов с шириной подошвы менее 10 м.);

- **слоя конечной толщины** (эта схема используется либо тогда, когда вблизи подошвы фундамента залегает скала, либо когда ширина подошвы фундамента превышает 10 м);

- **полуплоскости** (эту схему используют при расчете оснований ленточных фундаментов);

- **схему компрессионного сжатия** (в этом случае рассматривают область грунтового основания, неограниченную в плане и ограниченную по глубине; эта схема используется при расчете оснований фундаментов с большими размерами подошвы в плане).

Для того чтобы фактическая эпюра контактных напряжений соответствовала расчетной, используется **модель основания Штаермана**, которая является комбинацией моделей Винклера - Фусса (верхний слой) и упругой изотропной среды (нижний слой) [41. 127, 128]. Эта модель получила незначительное распространение в практике расчетов деформаций грунтовых оснований в связи с проблемой определения материальных констант ее верхнего слоя, толщина которого равна нулю.

Модель **упругой анизотропной среды** позволяет учитывать различие между свойствами грунтовых оснований в различных направлениях [66, 104, 135, 142]. Эта модель получила наибольшее распространение при расчете напряженно-деформированного состояния конструкций из композитных материалов [104, 109]. Для расчетов напряженно - деформированного состояния грунтовых оснований чаще всего используется вариант **ортотропного** основания. При этом учет анизотропии свойств грунтовых оснований при решении практических задач производится достаточно редко ввиду проблемы определения соответственных материальных констант.

Далее рассмотрим модели грунтовых оснований, позволяющих прогнозировать изменение осадок фундаментов во времени при действующей на них постоянной нагрузке, перераспределение с течением времени напряжений в грунтовых основаниях (в том числе и их **релаксацию**) и т.д.

Все относящиеся к данной группе модели грунта можно разбить на четыре группы [32, 65, 66, 82, 127, 128, 141, 144, 145].

I. Модели, описывающие деформации, некоторая доля которых реализуется мгновенно (т.е. сразу после приложения нагрузки), а некоторая доля запаздывает во времени, но полностью восстанавливается через некоторое время после разгрузки основания.

II. Модели, описывающие деформации, некоторая доля которых реализуется мгновенно (т.е. сразу после приложения нагрузки), а некоторая доля запаздывает во времени, но полностью необратима после разгрузки основания.

III. Модели, описывающие деформации, некоторая доля которых реализуется мгновенно (т.е. сразу после приложения нагрузки), а некоторая доля запаздывает во времени, но полностью восстанавливается через некоторое время после разгрузки основания. При этом некоторая доля деформаций полностью необратима после разгрузки основания.

IV. Особую группу образуют модели грунта, в которых **упругие константы в явном виде зависят от времени** [65, 136, 137, 151]. С их использованием удалось решить ряд важных практических задач, в частности, выполнить описание процесса так называемой **вторичной консолидации**. Указанные модели появились на начальном этапе становления реологии грунтов и реологии вообще. В технике теорию ползучести, в которой упругие константы в явном виде зависят от времени, принято называть **теорией криппа** [95]**.** При этом в механике грунтов эту теорию называют **теорией старения** [65]. Необходимо также особо подчеркнуть, что **теории старения,** принятые в механике грунтов и используемые при расчете бетонных и железо бетонных конструкций - абсолютно разные вещи [5, 7, 163].

В свою очередь, первая (т.е. I) группа из рассмотренных моделей грунта может быть разбита на такие подгруппы:

- **механические модели** [25, 37, 111];

- модели **упруговязкой** среды [111] (ряд авторов называет эту среду **вязкоупругой**) [82];

- модели **линейно-наследственной ползучей среды** [65] (ряд авторов называет эту среду **наследственно-упругой**) [109, 110].

Суть **механических моделей** заключается в том, что с использованием комбинации упругих элементов Гука, вязких элементов Ньютона, элементов сухого трения Сен-Венана и им подобных составляются механические модели (примеры их составления приведены в [37, 111]). Далее составляется **дифференциальное** уравнение движения модели, которое в одномерном случае имеет вид

$$\sum_{i=1}^{n} a_i \cdot \frac{\partial^i \varepsilon}{\partial\ t^i} - \sum_{i=1}^{m} b_i \cdot \frac{\partial^i \sigma}{\partial\ t^i} = 0\,. \tag{1.2.7}$$

Здесь ε - деформация; σ - напряжение; t - время; a_i и b_i - эмпирические коэффициенты, которые определяются либо из опытов на ползучесть либо из опытов на релаксацию.

Предполагается, что полученное таким образом уравнение движения с той или иной степенью точности позволяет описать трансформацию напряженно - деформированного состояния грунта во времени.

Наиболее известными и распространенными механическими реологическими моделями грунта являются:

- Модель Кельвина - Фойгта;
- Модель Максвелла:
- модель Пойнтинга - Томпсона;
- модель Лесерича;
- модель Джеффриса;
- модель Бюргерса.

Суть **упруговязких (**иногда их называют **вязкоупругими) моделей** заключается в том, что на основе тех или иных соображений и (или) опытных данных составляется уравнение движения грунта в процессе его ползучести вида (1.2.7). При этом не обязательно использовать механические элементы Гука, Ньютона и им подобные. Достаточно с использованием дифференциального уравнения n - й степени выполнить аппроксимацию полученных тем или иным способом экспериментальных данных.

Далее рассмотрим модели грунтового основания в виде **упруговязкой** (или что тоже самое **вязкоупругой) среды.** Для этой цели запишем равенство (1.2.7) в интегральной форме

$$\left.\begin{aligned} &\varepsilon(t)=\frac{1}{E}\cdot\left[\sigma(t)+\int\limits_0^t K(t-\tau)\cdot\sigma(\tau)\cdot d\tau\right];\\ &\textit{и}\\ &\sigma(t)=E\cdot\left[\varepsilon(t)-\int\limits_0^t R(t-\tau)\cdot\varepsilon(\tau)\cdot d\tau\right], \end{aligned}\right\}. \qquad (1.2.8)$$

Здесь ε *и* σ - см. пояснения к формуле (1.2.8); E - модуль упругости основания; $K(t-\tau)$ - ядро ползучести основания; $R(t-\tau)$ - его резольвента [111]; τ - имеющий размерность времени параметр.

Систему уравнений (1.2.8) можно получить, например, так. Применим к (1.2.7) одностороннее преобразование Лапласа по временной переменной t [44, 81]. После этого решим полученное таким образом алгебраическое уравнение относительно изображения деформации ε.

Оригиналом полученной таким образом функции и будет верхнее уравнение (1.2.8). Для того чтобы получить нижнее уравнение (1.2.8), следует решить изображение (1.2.7) относительно напряжения σ и далее - найти оригинал полученного таким образом выражения.

В заключение отметим, что между ядром ползучести и его резольвентой имеет место взаимосвязь вида [111]

$$K(t-\tau)-R(t-\tau)=\int_0^t R(\theta-\tau)\cdot K(t-\theta)\cdot d\theta=\int_0^t K(\theta-\tau)\cdot R(t-\theta)\cdot d\theta\,. \quad (1.2.9)$$

Здесь θ - имеющий размерность времени параметр.

Равенства (1.2.8) в ряде литературных источников имеют название **уравнений теории наследственной ползучести** [65, 111], а в ряде литературных источников - **уравнений теории наследственной ползучести.**

Необходимо отметить, что уравнения (1.2.7) и (1.2.8) отличаются только лишь формой записи. При этом с точки зрения физики процесса они описывают одно и то же явление, а именно - деформации, некоторая доля которых реализуется мгновенно, а некоторая доля запаздывает во времени, но полностью восстанавливается после разгрузки основания.

Поэтому в дальнейшем обладающие указанными свойствами модели основания, а именно - **механические,** модели **вязкоупругой, линейной наследственно-ползучей** и **наследственно-упругой** сред и им подобные мы будем называть **упруговязкими**. При этом будет рассматриваться только лишь **интегральная форма записи** уравнений состояния упруговязкой среды.

Если требуется выполнить учет упруговязких свойств грунта в рамках модели основания Винклера - Фусса, то используют соотношения вида [63, 71, 72, 73]:

$$\left.\begin{aligned}
&P(t)=\widetilde{C}_Z\cdot S(t)=C_Z\cdot\left[S(t)-\int\limits_0^t R(t-\tau)\cdot S(\tau)\cdot d\tau\right];\\
&и\\
&S(t)=\frac{P(t)}{\widetilde{C}_Z}=\frac{1}{C_Z}\cdot\left[P(t)+\int\limits_0^t K(t-\tau)\cdot P(\tau)\cdot d\tau\right].
\end{aligned}\right\}. \qquad (1.2.10)$$

Здесь P, S и C_Z - см. пояснения к формулам (1.2.1), а $K(t-\tau)$, $R(t-\tau)$, t и τ - см. пояснения к формулам (1.2.8).

Уравнения (1.2.10) называют **линейными уравнениями Вольтерра второго рода с разностными ядром и резольвентой** [81].

Равенства (1.2.10) авторами работ [63, 71, 72, 73, 136, 137] были использованы для решения таких задач фундаментостроения и механики грунтов:

- прогноза развития во времени кренов высотных сооружений;
- определения коэффициента устойчивости высотных сооружений;
- прогноза процесса развития во времени свайных фундаментов;
- прогноза напряженно - деформированного состояния системы “основание-фундамент (или фундаменты)-надфундаментное строение”.

В рамках модели **упруговязкого** основания аналог обобщенного закона Гука (1.2.6) имеет вид [65, 127, 128, 136, 137, 141, 144, 145]:

$$\sigma_{XX}=2\cdot\widetilde{G}\cdot\varepsilon_X+\widetilde{\lambda}\cdot e;$$

$$\sigma_{yy}=2\cdot\widetilde{G}\cdot\varepsilon_y+\widetilde{\lambda}\cdot e;$$

$$\sigma_{ZZ}=2\cdot\widetilde{G}\cdot\varepsilon_Z+\widetilde{\lambda}\cdot e; \qquad (1.2.11)$$

$$\tau_{xy} = \tilde{G} \cdot \gamma_{xy};$$

$$\tau_{xz} = \tilde{G} \cdot \gamma_{xz};$$

$$\tau_{yz} = \tilde{G} \cdot \gamma_{yz}, \qquad (1.2.11)$$

где σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz}, τ_{xy}, τ_{xz}, τ_{yz}, λ, G, ε_x, ε_y, ε_z, e, γ_{xy}, γ_{xz} и γ_{yz} - см. пояснения к формуле (1.2.6). Здесь

$$\left.\begin{aligned}
&y(t)\cdot\tilde{\lambda} = \lambda\cdot\left[y(t) - \int_0^t R(t-\tau)\cdot y(\tau)\cdot d\tau\right];\\
&y(t)\cdot\tilde{G} = G\cdot\left[y(t) - \int_0^t R(t-\tau)\cdot y(\tau)\cdot d\tau\right];\\
&\frac{y(t)}{\tilde{\lambda}} = \frac{1}{\lambda}\cdot\left[y(t) + \int_0^t K(t-\tau)\cdot y(\tau)\cdot d\tau\right];\\
&\frac{y(t)}{\tilde{G}} = \frac{1}{G}\cdot\left[y(t) + \int_0^t K(t-\tau)\cdot y(\tau)\cdot d\tau\right].
\end{aligned}\right\}, \qquad (1.2.12)$$

где $y(t)$ - некоторая функция времени [65].

Уравнения (1.2.11) являются записью уравнений состояния в рамках модели основания в виде упруговязкого основания **в операторной форме** [65]. Запись представленных в (1.2.11) **интегральных операторов** в развернутом виде представлена в (1.2.12).

В литературе имеется значительное число примеров использования равенств (1.2.11) для решения задач механики грунтов и фундаментостроения, в частности:

- определения напряженно - деформированного состояния находящегося в условиях компрессионного сжатия грунта [65, 127, 128, 142, 143, 144, 145, 148];

- определения зависимостей “осадка - время” фундаментов с круглой, прямоугольной и кольцевой формой подошвы [16, 65, 143, 144];

- определения зависимостей “общий крен - время” фундаментов с круглой, прямоугольной и кольцевой формой подошвы [65, 74, 144, 145, 146, 157];

- определения напряженно - деформированного состояния системы “основание - фундамент (или фундаменты) - надфундаментное строение” [136, 137, 138, 140].

При этом данные решения получены в рамках расчетных схем основания в виде полупространства и слоя конечной толщины [65, 144, 145].

Простейшей относящейся ко второй (т.е. II) группе моделью является модель Максвелла [25, 111]. В этом случае уравнение состояния в одномерном случае имеет вид:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{E} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{1}{\eta} \cdot \sigma, \qquad (1.2.13)$$

где ε, σ и t - см. пояснения к формуле (1.2.7); E - модуль упругости а η - вязкость основания [25, 111].

Далее проинтегрируем обе части уравнения (1.2.13) по переменной t и положим $\varepsilon(0) = 0$. Имеем:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \int_0^t \frac{\sigma(\tau)}{\eta} \cdot d\tau . \qquad (1.2.14)$$

Равенство (1.2.14) является интегральной записью уравнения (1.2.13).

Далее положим в (1.2.14) вязкость зависящей от времени, т.е. $\eta = \eta(t)$ и обозначим

$$K(\tau) = \frac{E}{\eta(\tau)} . \qquad (1.2.15)$$

В этом случае равенство (1.2.14) примет вид

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E} \cdot \left[\sigma(t) + \int_0^t K(\tau) \cdot \sigma(\tau) \cdot d\tau \right]. \qquad (1.2.16)$$

Первое слагаемое правой части (1.2.16) описывает упругие полностью обратимые деформации, а второе - накопление с течением времени полностью необратимых (т.е. не исчезающих после снятия нагрузки, а иными словами - **пластичных**) деформаций [65, 66]. Поэтому модели грунта с уравнениями состояния вида (1.2.16) в дальнейшем будем называть **упругопластичными.**

Для одновременного учета упругих, вязких и пластических свойств грунта рассмотрим составное ядро ползучести вида

$$K(t,\tau) = K_1(t-\tau) + K_2(\tau), \qquad (1.2.17)$$

где $K_1(t-\tau)$ - часть ядра, учитывающая запаздывающие во времени полностью обратимые, а $K_2(\tau)$ - пластичные деформации.

В этом случае уравнение состояния грунта имеет вид

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E} \cdot \left[\sigma(t) + \int_0^t K(t,\tau) \cdot \sigma(\tau) \cdot d\tau \right]. \qquad (1.2.18)$$

Равенство (1.2.18) носит название **линейного интегрального уравнения Вольтерра второго рода** [81].

Поскольку равенство (1.2.18) одновременно позволяет учитывать упругие вязкие и пластические свойства грунта, соответствующую ему модель основания будем называть **упруговязкопластической** [141, 144, 145].

Эта модель была использована для решения ряда задач об определении напряженно - деформированного состояния находящегося под воздействием циклической нагрузки основания и расчета напряженно - деформированного состояния систем “основание - фундамент (или фундаменты) - надфундаментное строение” [136, 137, 138, 140, 141, 144, 145].

В заключение отметим, что равенство (1.2.18) допускает естественное обобщение на уравнения состояния (1.2.10)…(1.2.12), в которых для одновременного учета упругих, вязких и пластических свойств грунта следует разностное ядро $K(t-\tau)$ заменить ядром вида (1.2.17).

Для этой цели также может быть использован т.н. **принцип В.Вольтерра**, суть которого заключается в формальной замене входящих в уравнения состояния упругих сред материальных констант соответствующими интегральными операторами [116].

В целом, изложенные в настоящем разделе материалы исследований позволили нам установить следующее.

1. В настоящее время существуют модели изотропных оснований, позволяющие учитывать свойства упругости, вязкости и пластичности грунта. При этом вопрос разработки моделей, предназначенных для учета свойств вязкости и пластичности анизотропных оснований, остается открытым.
2. С точки зрения физики процесса модели наследственно - ползучего, вязкоупругого, упруговязкого и наследственно - упругого оснований - это одно и тоже. С их использованием описываются полностью обратимые деформации, часть которых при разгрузке грунта восстанавливается мгновенно, а часть - через некоторое время после снятия нагрузки. При этом различие между перечисленными моделями заключается лишь в форме (дифференциальной или интегральной) записи уравнений состояния.
3. Для учета реологических (т.е. упруго-вязких и упруговязкопластических) свойств изотропных неводонасыщенных оснований в уравнениях состояния упругой линейной изотропной среды (т.е. в обобщенном законе Гука) упругие материальные константы (т.е. константы Ламе) следует заменить соответствующими интегральными операторами.
4. В литературе имеются примеры удачного использования моделей упруговязкой и упруговязкопластических сред для решения практических задач механики грунтов и фундаментостроения. При этом эти данные носят разобщенный и фрагментарный характер и, следовательно, нуждаются в осмыслении, анализе,

обобщении и систематизации [136, 137, 138, 140, 141, 144, 145, 168, 169, 170].

1.3. МОДЕЛИ И РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ.

Процесс развития во времени деформаций грунтовых водонасыщенных оснований обусловлен постепенным отжатием из пор грунта воды и деформированием, разрушением и восстановлением межчастичных цементационных и водно-коллоидных связей [25].

В ранних работах по реологии грунтов предполагалось, **что процесс ползучести грунта** начинается после **завершения фильтрационной консолидации** [33, 34, 37, 121, 122, 127, 128]. В этой связи ползучесть грунтового скелета иногда называют **вторичной консолидацией**.

В.А. Флорин показал, что процессы фильтрационной консолидации и ползучести грунтового скелета протекают одновременно [65, 66]. В этой связи в настоящее время считают, что процесс развития во времени деформаций водонасыщенных грунтовых оснований обусловлен суперпозицией двух физических процессов - **фильтрационной консолидации и ползучести** грунтового скелета [127, 128].

Кроме того, известно, что наличие (или отсутствие) воды в порах грунта существенно влияет на его напряженно - деформированное состояние [65, 66]. Поэтому различают такие основные модели грунтовых оснований [65, 66]:

- **водонасыщенное основание;**
- **неводонасыщенное основание.**

Обзор моделей неводонасыщенных оснований представлен в разделе 1.2. Поэтому в настоящем разделе будут рассматриваться только лишь водонасыщенные основания.

Процесс фильтрационной консолидации в водонасыщенных основаниях обусловлен отжатием воды из пор грунта и деформированием его скелета [65, 66, 164, 165]. В этой связи на его протекание оказывают такие факторы.

1. Фильтрационные свойства грунта (точнее, значение его коэффициента фильтрации).
2. Деформационные свойства грунтового скелета.
3. Реологические свойства грунтового скелета.
4. Текстурные особенности строения грунтовой толщи.
5. Размеры в плане и конфигурация загруженной области.
6. Путь (или пути) фильтрации поровой жидкости.
7. Напряженно - деформированное состояние основания.

В этой связи (пункт 7) различают такие основные расчетные схемы водонасыщенного основания [127, 128].

1. Компрессионная задача.
2. Плоская задача (имеется в виду случай плоской деформации).
3. Пространственная задача.

При этом в рамках плоской задачи в зависимости от строения грунтовой толщи различают расчетные схемы плоскости, полуплоскости и слоя конечной толщины [127, 128].

Кроме того, в рамках пространственной задачи в зависимости от строения грунтовой толщи различают расчетные схемы пространства, полупространства и слоя конечной толщины [65, 66].

Необходимо также отметить, что в зависимости от свойств грунтового скелета (деформационных и реологических) различают такие **основные** модели водонасыщенных оснований [65, 66]:

- упругой линейной водонасыщенной изотропной среды;
- упругой линейной водонасыщенной анизотропной среды;

- линейной водонасыщенной упруговязкой изотропной среды;
- линейной водонасыщенной упруговязкой анизотропной среды;
- линейной водонасыщенной упруговязкопластической изотропной среды;
- линейной водонасыщенной упруговязкопластической анизотропной среды.

Впервые задача фильтрационной консолидации в рамках модели упругой линейной водонасыщенной среды была сформулирована и решена для случая компрессионной задачи К. Терцаги. При этом в качестве уравнений состояния был принят закон Гука. Поскольку задача решалась в квазистатической постановке (точнее при постоянной во времени нагрузке на основание), проблему удалось свести к определению порового давления с последующим определением напряжений и далее - перемещений [65, 66, 121, 122].

Полученные К. Терцаги решения при тех или иных допущениях используются для расчета осадок фундаментов и в настоящее время.

Однако они не позволяют учесть ряд особенностей уплотнения реальных грунтовых оснований (в частности, затухание эпюры нормальных вертикальных напряжений по глубине). В этой связи появился ряд т.н. **инженерных методов,** суть которых заключается в поиске компромисса между фактическим напряженно - деформированным состоянием грунта и полученными в рамках компрессионной задачи решениями.

Наиболее удачным из этих методов является предложенный Н. А. Цытовичем метод эквивалентного слоя, суть которого сводится к построению решения для грунта, находящегося в условиях компрессионного сжатия под воздействием распределенной некоторым образом по глубине основания объемной нагрузки [131, 132, 133, 134]. При этом закон изменения объемной нагрузки в идеале соответствует эпюре распределения нормальных вертикальных напряжений, рассчитанных для случая пространственной задачи. Такой подход, однако, не позволяет полностью отразить фактический характер уплотнения находящихся под воздействием местной нагрузки грунтовых оснований, поскольку при компрессии нет возможности оттока поровой жидкости в горизонтальном направлении.

Н. А. Цытовичем также была исследована проблема консолидации при компрессии слоистых оснований. При этом было предложено интерпретировать их как квазиоднородные, а приведенный коэффициент фильтрации основания определять как среднее гармоническое его частных значений. Правомерность такого подхода для случая, если частные значения материальных констант основания различаются не более, чем на один десятичный порядок, была подтверждена в работах [153, 158].

Дальнейшее развитие теория фильтрационной консолидации получила в работах В. А. Флорина и М. Био, которые в качестве уравнений состояния приняли обобщенный закон Гука. Это позволило им распространить результаты К. Терцаги на случай пространственной задачи [127, 128, 164, 165]. При этом в качестве допущения был принят постулат о постоянстве во времени суммы главных тотальных напряжений (т.н. принцип гидроемкости). Это существенно упростило математическую сторону проблемы, но оказалось неоправданным с физической точки зрения [127, 128].

Это противоречие удалось устранить Ю. К. Зарецкому, который принял сумму главных напряжений переменной во времени (с точки зрения математики это привело к появлению в уравнении порового давления дополнительного слагаемого) [65, 66].

Для решения полученной таким образом системы уравнений Ю. К. Зарецкий предложил использовать процесс итерации, суть которого сводится к определению т.н. начального напряженно-деформированного состояния грунта как для некоторой фиктивной среды с приведенными свойствами и далее - его уточнении [65]. Однако выражения для напряжений и перемещений в этом случае имеют весьма громоздкий вид. Поэтому решение задач об определении осадок основания Ю. К. Зарецкому удалось получить лишь в первом приближении [65].

В этой связи представляют интерес полученные авторами работ [142, 144, 145] алгоритмы построения точных общих и далее - частных решений задачи об уплотнении упругих водонасыщенных оснований.

Динамическая нагрузка по характеру воздействия на водонасыщенные грунтовые основания существенно отличается от квазистатической. В этой связи целесообразно проанализировать посвященные этой проблеме работы.

В.М.Лятхером и Б. И. Дидухом при определении напряженно - деформированного состояния **водонасыщенного весомого основания** была рассмотрена некоторая **фиктивная упругая среда.** При этом в качестве уравнений состояния был принят обобщенный закон Гука [87].

Такой подход, однако, не позволил выявить даже качественную картину процесса [149].

Попытка уточнить полученные В. М. Лятхером и Б. И. Дидухом результаты была предпринята автором работы [66]. Им кроме основных соотношений механики сплошной среды (законы сохранения массы, изменения количества движения, Дарси, принцип осреднения) был также использован т.н. принцип Терцаги, суть которого заключается в установлении взаимосвязи между средним значением действующего в точке основания напряжения и действующими в этой точке поровым давлением и напряжением в грунтовом скелете [66]. При этом предполагалось, что скорости движения грунтового скелета и поровой жидкости различны (т.е. в процессе колебаний имеет место "проскальзывание" грунтового скелета относительно поровой жидкости). Полученная таким образом система **уравнений динамической теории фильтрационной** консолидации имеет весьма громоздкий вид и отличается от идентичной в математическом смысле системы уравнений динамической теории взаимосвязанной термоупругости и вообще, уравнений тепломассопереноса [75, 104]. На наш взгляд, это объясняется большим числом принятых при выводе уравнений динамической теории фильтрационной консолидации допущений (принцип Терцаги, осреднение плотности "газированной" поровой жидкости, допущение о постоянстве пористости в процессе уплотнения и т.д.). Аналогичные проблемы имеют предложенные авторами работы [124] уравнения состояния, которые включают в себя материальные константы, для определения которых нет ни методик, ни нормативных документов. В этой связи, на наш взгляд, целесообразно при выводе уравнений состояния грунта принять изложенный в [13, 66, 104] подход, заключающийся в использовании для этой цели соотношений феноменологической термодинамики.

В этой связи заслуживают внимания работы авторов работ [103, 149, 150, 152].

В целом, анализ выполненных в рамках модели упругого водонасыщенного основания исследований позволил нам сделать такие выводы.

1. Решение задачи об уплотнении водонасыщенного упругого линейного изотропного водонасыщенного основания сводится к решению системы уравнений равновесия и состояния, (**последние включают в себя обобщенный закон Гука и закон Дарси**) и удовлетворении граничных условий для нагрузки и порового давления.

2. При этом различают теории **невзаимосвязанной** и **взаимосвязанной** фильтрационной консолидации. В первом случае предполагается, что напряжения в грунтовом скелете не оказывают существенного влияния на давление в поровой жидкости, а во втором случае это влияние учитывается полностью.

3. Также различают модели **весомого** и **невесомого** грунтовых оснований. В первом случае выполняется учет инерционных свойств основания, а во втором - нет.

4. По форме записи (т.е. в математическом смысле) уравнения **теории фильтрационной консолидации** в рамках модели водонасыщенного упругого линейного изотропного водонасыщенного **невесомого** основания полностью совпадают с уравнениями **теории термоупругости**.

5. При этом уравнения **теории фильтрационной консолидации** в рамках модели водонасыщенного упругого линейного изотропного водонасыщенного **весомого** основания имеют несколько модификаций и абсолютно не совпадают с уравнениями **теории термоупругости**.

На наш взгляд, это очевидное противоречие нуждается в исследовании и анализе, поскольку все перечисленные уравнения относятся к одной группе уравнений **тепломассопереноса**.

6. Уравнения состояния упругого водонасыщенного изотропного основания в декартовой системе координат имеют вид:

$$\sigma_{xx} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_x + \lambda \cdot e - \frac{1}{\beta} \cdot P\,;$$

$$\sigma_{yy} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_y + \lambda \cdot e - \frac{1}{\beta} \cdot P\,;$$

$$\sigma_{zz} = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e - \frac{1}{\beta} \cdot P;$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = G \cdot \gamma_{xy};$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = G \cdot \gamma_{xz};$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = G \cdot \gamma_{yz};$$

$$\frac{\partial\ e}{\partial\ t} = \frac{k_{\phi}}{\gamma_w} \cdot \Delta P\,. \qquad (1.3.1)$$

Здесь σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz}, τ_{xy}, τ_{xz}, τ_{yz}, λ, G, ε_x, ε_y, ε_z, e, γ_{xy},γ_{xz}, γ_{yz} - см. пояснения к формулам (1.2.6), t - время, а P - поровое давление.

7. При этом посвященные определению напряженно - деформированного состояния грунта в рамках модели водонасыщенного анизотропного основания работы либо носят разрозненный и фрагментарный характер либо отсутствуют вообще.

Опыт строительства и эксплуатации зданий и сооружений показал, что в ряде случаев процесс развития во времени их деформаций продолжается и после завершения фильтрационной консолидации [33, 34, 37, 66, 93, 127, 128, 155]. В этой связи для описания отмеченного явления было предложено использовать теорию старения (иногда ее называют теорией криппа), а процесс уплотнения основания разделить на "первичную" и "вторичную".

Поскольку такое деление весьма условно (на самом деле эти два процесса протекают одновременно и на разных этапах уплотнения характеризуются различным вкладом в процесс уплотнения грунта), возникли проблемы интерпретации лабораторных испытаний и приведения их в соответствие к натурным условиям. Поэтому для описания процесса вторичной консолидации были предложены уравнения состояния, установленные на основе исследования закономерностей поведения под нагрузкой т.н. механических моделей, состоящих из упругих, вязких, Сен - Венановых и других элементов (см. раздел 1.2).

В дальнейшем было установлено, что для записи уравнений состояния грунтового скелета при ползучести удобнее использовать интегральные операторы Вольтерра с разностным ядром [127, 128]. Такой подход впервые был использован В. А. Флориным и получил свое развитие в работах Ю. К. Зарецкого [65, 66, 133]. При выводе уравнений состояния грунтового скелета Ю. К. Зарецкий применил т.н. принцип Вольтерра, суть которого заключается в замене ряда входящих в уравнения состояния материальных констант на некоторые интегральные операторы [116].

Принятый Ю. К. Зарецким вид ядра ползучести описывает полностью обратимые во времени деформации. Это вполне оправдано, если действующая на фундамент нагрузка носит неубывающий во времени характер. Однако если на основание действует либо циклическая, либо динамическая нагрузка, соотношения линейной теории наследственной упругости становятся неприемлемыми. В этой связи авторами работ [43, 62, 66, 67, 118, 119] для описания процесса накопления деформаций при загрузке-разгрузке грунта было предложено использовать элементы теорий пластичности, упругопластичности, различных их модификаций и комбинаций.

Однако эти предложения, несмотря на их теоретическую значимость, не могут быть в настоящее время использованы для практических расчетов, поскольку имеет место проблема экспериментального определения входящих в соответствующие перечисленным теориям уравнения состояния материальных констант. В этой связи заслуживает внимания предложенная авторами работ [136, 137, 141, 144, 145] линейная модель грунтового основания, позволяющая учитывать накопление деформаций при загрузке-разгрузке. Суть предложения заключается в том, что в уравнениях состояния разностное ядро ползучести следует заменить составным вида (1.2.17). Таким образом, рекомендуемые авторами [136, 137, 141, 144, 145] уравнения состояния являются модификацией соотношений теории наследственной упругости [65, 66] (поскольку позволяют учитывать накопление необратимых деформаций) и принятой для расчета бетонных конструкций теории Маслова - Арутюняна [7, 162, 163] (поскольку принятая в них функция старения учитывает набор бетоном прочности при твердении). Необходимо подчеркнуть, что в данном случае различие между функциями старения объясняется тем, что бетонные конструкции в результате протекающих в них химических реакций в течение длительного времени набирают прочность.

При этом также возрастает их модуль упругости. Поскольку в грунтовых основаниях указанные процессы не имеют места, принятый в уравнениях состояния грунта иной вид функции старения является вполне естественным.

Расчету процессов развития во времени кренов фундаментов посвящены работы авторов [63, 71, 72, 73]. При этом исследователями [63, 71, 73] основание интерпретировалось как Винклеровское, обладающее наследственной ползучестью. На наш взгляд, такой подход не совсем оправдан, поскольку в данном случае не учитывается строение основания по глубине и его распределительные свойства. Автором работы [72] сделана попытка решения проблемы в рамках модели упругой водонасыщенной среды при использовании расчетной схемы полупространства. Для приближенного решения задачи им было предложено использовать метод Жемочкина. При этом был рассмотрен лишь фундамент круглой формы, в силу чего полученные в работе результаты являются недостаточно общими применительно к возникающим в инженерной практике задачам.

В этой связи представляют интерес работы авторов [6, 9, 16, 141, 143, 144, 146], в которых изложены методики расчета кренов и осадок фундаментов различной формы на обладающем свойством ползучести водонасыщенном грунтовом основании.

Однако эти работы имеют такие общие недостатки.

1. В них принята расчетная схема абсолютно-гибкого фундамента.

2. Средние осадки и крены рассчитаны только лишь для центральной точки фундамента.

3. Процедура учета свойства ползучести грунта при расчете осадок и кренов фундаментов предполагает одновременное использование

табличного и графоаналитического методов, в силу чего она является громоздкой и неудобной.

4. Принятые в работах [6, 9, 16, 141, 143, 144, 146] уравнения состояния нуждаются в их дополнительном обосновании и по мере надобности - уточнении.

Необходимо также отметить работы [136, 137, 138], в которых предложены алгоритмы и методики совместного расчета напряженно - деформированного состояния систем “основание - фундамент (или фундаменты) - надфундаментное строение” при учете свойства ползучести грунтового скелета водонасыщенных грунтовых оснований.

В целом, изложенные в разделе 1.3 материалы исследований позволяют сделать такие выводы.

1. Для учета свойства ползучести грунтового скелета водонасыщенных грунтовых оснований авторами работ [6, 9, 16, 141, 143, 144, 146] было предложено использовать уравнения состояния вида (1.2.17) и (1.2.18).

2. В этом случае уравнения состояния изотропного водонасыщенного основания (их аналогами являются равенства (1.2.11) и(1.3.1)), грунтовый скелет которого обладает реологическими свойствами, имеют вид:

$$\sigma_{xx} = 2\cdot\tilde{G}\cdot\varepsilon_x + \tilde{\lambda}\cdot e - \frac{1}{\tilde{\beta}}\cdot P;$$

$$\sigma_{yy} = 2\cdot\tilde{G}\cdot\varepsilon_y + \tilde{\lambda}\cdot e - \frac{1}{\tilde{\beta}}\cdot P;$$

$$\sigma_{zz} = 2\cdot\tilde{G}\cdot\varepsilon_z + \tilde{\lambda}\cdot e - \frac{1}{\tilde{\beta}}\cdot P; \qquad (1.3.2)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tilde{G} \cdot \gamma_{xy};$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \tilde{G} \cdot \gamma_{xz};$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \tilde{G} \cdot \gamma_{yz};$$

$$\frac{\partial\ e}{\partial\ t} = \frac{k_{\phi}}{\gamma_w} \cdot \Delta P. \qquad (1.3.2)$$

Здесь σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz}, τ_{xy}, τ_{xz}, τ_{yz}, λ, G, ε_x, ε_y, ε_z, e, γ_{xy},γ_{xz}, γ_{yz} - см. пояснения к формулам (1.2.6), t - время, а P - поровое давление; $\tilde{G}$ и $\tilde{\lambda}$ - см. пояснения к формулам (1.2.12).

3. Равенства (1.3.2) могут быть использованы для учета как для упруговязких, так и упруговязкопластических свойств грунтового скелета. В первом случае следует принимать ядра ползучести вида (1.2.8), а во втором в форме (1.2.17) и (1.2.18).

4. Принятое в качестве уравнения состояния авторами работ [65, 66, 69, 70] последнее равенство (1.3.2) означает, что скорость изменения объемной деформации прямо пропорциональна градиенту порового давления и не зависит от реологических свойств грунтового скелета. На наш взгляд этот факт нуждается в подтверждении или, покрайней мере, в обосновании.

5. В литературе отсутствуют уравнения состояния, позволяющие учитывать реологические свойства грунтового скелета водонасыщенных **анизотропны**х весомых и невесомых оснований.

1.4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ. ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ

Выполненный обзор литературных источников позволил установить следующее.

1. Вследствие протекающих в грунтовых основаниях реологических процессов (т.е. фильтрационной консолидации и ползучести грунтового скелета) происходит трансформация напряженно - деформированного состояния оснований, фундаментов и надфундаментных строений. В ряде случаев эта трансформация приводит к значительным повреждениям и деформациям несущих элементов конструкций зданий и сооружений, вплоть до их разрушения. **В этой связи проблема прогноза напряженно - деформированного состояния грунтовых оснований является актуальной и требует своего решения.**

2. Для полного учета реологических свойств грунтового основания наиболее перспективной является **модель водонасыщенного упруговязкопластического** основания.

3. Для описания напряженно - деформированного состояния водонасыщенных оснований целесообразно использовать теорию **взаимосвязанной фильтрационной консолидации**. В этом случае необходимо одновременно учитывать влияние на напряженно - деформированное состояние грунтового скелета давления в поровой жидкости и наоборот - напряжений в грунтовом скелете на поровое давление.

4. Принятое в настоящее время для прогноза напряженно - деформированного состояния грунтовых оснований уравнение состояния, связывающее объемную деформацию линейного изотропного

обладающего свойством ползучести основания и градиент давления в его поровой жидкости, нуждается в дополнительном обосновании. Это объясняется тем, что согласно данному уравнению состояния скорость изменения объемной деформации прямо пропорциональна градиенту порового давления и не зависит от реологических свойств грунтового скелета.

5. Принятые в настоящее время для прогноза напряженно - деформированного состояния изотропных водонасыщенных весомых грунтовых оснований уравнения состояния либо не отражают физической сути процесса, либо включают в себя материальные константы, для определения которых не существует нормативных документов. При этом они отличаются друг от друга и классических уравнений теории тепломассопереноса.

6. С точки зрения физики процесса модели наследственно - ползучего, вязкоупругого, упруговязкого и наследственно - упругого оснований - это одни и те же модели грунта, поскольку с их использованием описываются полностью обратимые деформации, часть которых при разгрузке грунта восстанавливается мгновенно, а часть - через некоторое время после снятия нагрузки.

7. В рамках модели весомой и невесомой, водо и неводонасыщенных обладающих упруговязкопластическими свойствами сред практически не исследованы проблемы расчета напряженно - деформированного состояния анизотропных оснований. В данном случае проблемой является не только решение конкретных задач механики грунтов и фундаментостроения, но и получение соответствующих уравнений состояния.

В целом, изложенные в первом разделе настоящей монографии материалы исследований позволили нам сделать такие выводы.

1. В рамках **модели весомого водо и неводонасыщенного обладающего свойством ползучести анизотропного основания** имеет место проблема систематизации и унификации уравнений движения и состояния грунта.

2. Целесообразно систематизировать также основные расчетные схемы грунтовых оснований в декартовой, цилиндрической и сферической системах координат и сформулировать соответствующие этим схемам начальные и граничные условия задач механики грунтов и фундаментостроения.

3. В настоящее время для практических расчетов напряженно - деформированного состояния водо и неводонасыщенных оснований используются различные приближенные методы. В этой связи целесообразно разработать методики построения точных решений задач теории взаимосвязанной фильтрационной консолидации.

4. В рамках различных моделей грунтовых оснований целесообразно в графическом виде получить качественные зависимости “осадка - время” и “осадка - нагрузка”. Это позволит выявить достоинства и недостатки каждой из моделей, а, следовательно, и область ее применения.